



**João Guilherme Fonseca Cal Gonzalez**

Licenciatura em Ciências da Engenharia Mecânica

**Desenvolvimento e Aplicação de  
Sondas Inovadoras de Correntes  
Induzidas Para Ensaaios Não Destrutivos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Telmo Jorge Gomes dos Santos, Doutor, FCT-UNL



**FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Setembro 2011

Copyright @ João Guilherme Fonseca Cal Gonzalez, FCT /UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## AGRADECIMENTOS

Sinto-me agradecido pelas pessoas que ao longo deste trabalho me apoiaram e o tornaram realidade.

Ao Professor Telmo Santos, agradeço o seu empenho, o qual se traduziu num eixo decisivo para o resultado deste trabalho. Agradeço pela inteligência e simpatia com que me guiou nesta última etapa, e pela valiosa transmissão de conhecimentos na área dos END.

À Professora Rosa Miranda, agradeço igualmente o acompanhamento e o cuidado prestado em alguns domínios do trabalho.

Ao Eng. Luís Rosado do DEEC do IST, agradeço todo o empenho e dedicação prestado no âmbito da parte electrónica que envolve todo este trabalho de dissertação, bem como toda a valiosa transmissão de conhecimentos na programação das componentes electrónicas que estão envolvidas no desenvolvimento da sonda IOnic.

A todos os meus colegas que ao longo destes anos têm sido um apoio fundamental e que me ajudaram a passar todas as vicissitudes da vida e a chegar onde estou hoje. Um Obrigado a todos eles, Francisco Alho, Gonçalo Almeida, Tiago Joaquim e Nuno Pinto.

Aos outros, os de antes e os de agora que me acompanharam ao longo desta caminhada com um companheirismo e amizade supremo.

Agradeço de um modo especial a ti, pelo carinho e compreensão, Rita.

A todos os meus familiares que à sua maneira contribuíram decisivamente para a realização deste trabalho.

Agradeço de um modo especial a minha Mãe por todo o apoio e força que me deu em alturas fundamentais. E ao meu Pai cujas memórias me ajudaram em muitas alturas.

Desejo também agradecer às seguintes instituições e empresas:

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Universidade Nova de Lisboa (UNL), Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), em particular à Área Científica de Tecnologia Mecânica.

Ao Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (DEEC) do Instituto Superior Técnico (IST) – pólo Alameda.

Ao ISQ – Instituto de Soldadura e Qualidade.





## RESUMO

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são determinantes para a fiabilidade de materiais cuja integridade é de extrema importância. O aparecimento recente de novos materiais e tecnologias de produção têm conduzido ao aparecimento de defeitos com morfologias diferentes dos defeitos característicos dos materiais convencionais, processados por tecnologias convencionais. Desenvolvimentos recentes ao nível dos END por Correntes Induzidas (CI) resultaram na criação de uma nova configuração de sonda designada *IOnic Probe*. Esta sonda tem demonstrado bom desempenho na detecção de micro-defeitos superficiais

O objectivo deste trabalho foi optimizar a geometria da sonda *IOnic* para melhorar a qualidade do seu sinal e aumentar a eficácia na detecção de micro-defeitos.

Foram considerados seis parâmetros geométricos distintos e criadas doze configurações de sondas diferentes. Foi realizada uma simulação numérica do sinal de cada configuração da sonda na presença de um defeito padrão. As cinco melhores configurações foram produzidas e validadas experimentalmente. Foram também concebidos e produzidos os meios laboratoriais de inspecção automatizada.

Os resultados da validação experimental foram concordantes com a simulação numérica. Foi possível compreender a influência de cada parâmetro geométrico no sinal da sonda e determinar a sua configuração óptima. Os meios de inspecção laboratoriais desenvolvidos mostraram-se adequados aos requisitos estabelecidos.

## PALAVRAS-CHAVES

Ensaios Não Destrutivos (END)

Correntes Induzidas (CI)

Sonda *IOnic*

Micro-defeitos

Optimização



# ABSTRACT

The Non-Destructive Testing (NDT) are crucial to the reliability of materials whose integrity is of utmost importance. The recent discoveries of new materials and production technologies have led to the discovery of defects with different morphologies of the characteristic defects of conventional materials, processed by conventional technologies. Recent developments at the END level through eddy current (EC) led to the creation of a new configuration called *IONic Probe*. This *Probe* has shown good performance in the detection of micro-surface defects

The aim of this work was to optimize the geometry of the *IONic Probe* to improve the quality of its signal and increase efficiency in detecting micro-defects.

We took into account six different geometrical parameters and created twelve different *Probe* settings. We performed a numerical simulation of the signal from each *Probe* configuration in the presence of a defective pattern. The five best configurations were produced and experimentally validated. We also designed and produced the automated inspection of laboratory facilities.

The experimental validation results were in agreement with the numerical simulation. It was possible to understand the influence of each geometric parameter on the signal of the *Probe* and also to establish its optimum configuration. The means of laboratory inspection developed were suitable to the established requisites.

# KEY-WORDS

Non-Destructive Testing (NDT)

Eddy Currents (EC)

*IONic Probe*

Micro-defects

Optimization



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO .....	iii
PALAVRAS-CHAVES .....	iii
ABSTRACT .....	v
KEY-WORDS .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE TABELAS .....	xvii
NOMENCLATURA .....	xix
Nomenclatura Romana .....	xix
Nomenclatura Grega .....	xix
Siglas .....	xxi
1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - Estado da Arte e Motivação .....	1
1.2 - Resumo Alargado.....	2
1.2.1 - Objectivos Tecnológicos e Científicos .....	2
1.2.2 - Trabalhos Realizados .....	3
1.2.3 - Resultados Obtidos e Conclusões .....	4
1.3 - Estrutura da Tese.....	4
2 - REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	7
2.1 - Introdução .....	7
2.2 - Ensaios Não Destrutivos (END) .....	8
2.3 - Correntes Induzidas (CI).....	8
2.3.1 - Fundamentos do método de END por CI.....	9
2.3.2 - Limitações do método .....	12
2.4 - Variantes do método e de Sondas .....	12
2.4.1 - Método convencional (sondas axissimétricas e helicoidais).....	12
2.4.2 - Micro-bobinas matriciais (Array) .....	14
2.4.3 - Correntes Induzidas Pulsadas.....	15
2.4.4 - Giant Magnetoresistance (GMR).....	18
2.4.5 - MWM® (Meandering Winding Magnetometer) .....	21
2.4.6 - SQUID .....	26
2.4.7 - Sonda de CI “ <i>IOnic Probe</i> ” .....	29
2.5 - Síntese do Capítulo .....	36
3 - METODOLOGIA DE OPTIMIZAÇÃO .....	37

3.1	- Introdução .....	37
3.2	- Principais parâmetros operacionais.....	38
3.3	- Matriz das Sondas .....	40
3.4	- Matriz das Relações .....	42
3.5	- Gráfico Ilustrativo do Conceito de Amplitude e <i>Spread</i> .....	43
3.6	- Síntese do capítulo .....	44
4	- MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	45
4.1	- Introdução .....	45
4.2	- Descrição do modelo de simulação.....	46
4.3	- Estratégia de simulação.....	50
4.3.1	- Efeito do tamanho do bloco e condições de fronteira .....	51
4.3.2	- Largura do defeito .....	54
4.3.3	- Espaçamento entre aquisições.....	56
4.3.4	- Frequências .....	57
4.3.5	- Variação do <i>lift-off</i> da sonda .....	58
4.3.6	- Corrente.....	59
4.4	- Efeito do parâmetro E1 – Comprimento do filamento de excitação .....	61
4.5	- Efeito do parâmetro E2 – Espessura do filamento de excitação .....	63
4.6	- Efeito do parâmetro E3 – Posição do filamento de excitação.....	64
4.7	- Efeito do parâmetro B1 – Espessura e Espaçamento das Bobinas Sensíveis.....	66
4.8	- Efeito do parâmetro B2 – Número de espiras das Bobinas Sensíveis.....	68
4.9	- Efeito do parâmetro B3 – Diâmetro das Bobinas Sensíveis .....	70
4.10	- Simulação dos comportamentos das diferentes configurações de sonda .....	72
4.11	- Síntese do capítulo .....	76
5	- DESENVOLVIMENTOS EXPERIMENTAIS DE END POR CORRENTES INDUZIDAS.....	79
5.1	- Introdução .....	79
5.2	- Vista Global .....	80
5.3	- Produção das sondas IOnic .....	81
5.4	- Caracterização dos protótipos da sonda .....	84
5.5	- Dispositivo automatizado de locomoção e posição das sondas .....	86
5.6	- Dispositivos electrónicos .....	93
5.7	- <i>Software</i> de END dedicado (Labview) .....	96
5.8	- Síntese do capítulo .....	97
6	- VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE END POR CORRENTES INDUZIDAS.....	100

6.1	- Introdução .....	100
6.2	- Aplicação a Condições de Defeitos Padrão .....	101
6.2.1	- Caracterização da Aplicação .....	101
6.2.2	- Resultados .....	103
6.3	- Síntese do Capítulo .....	106
7	- CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	108
7.1	- Introdução .....	108
7.2	- Conclusões .....	109
7.3	- Propostas Para Desenvolvidos Futuros .....	111
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112
	ANEXOS .....	I
A1	– Gama de frequências para uma profundidade de penetração de 36.8% .....	II
A2	– Propriedades Eléctricas dos Blocos utilizados nas Simulações Numéricas .....	III
A 2.1	– Propriedades Eléctricas gerais do Alumínio no <i>Software CST Studio Suite</i> .....	III
A 2.2	– Propriedades Eléctricas gerais do Ar no <i>Software CST Studio Suite</i> .....	V
A3	– Desenhos técnicos de produção das peças que compõem a mesa XY. ....	VI
A 3.1	– Apoio da Roldana .....	VI
A 3.2	– Suporte do motor do eixo X .....	VII
A 3.3	– Suporte do motor do eixo Y .....	VIII
A 3.4	– Suporte de ligação do barramento principal à estrutura base .....	IX
A 3.5	– Suporte das sondas principais .....	X
A 3.6	– Suporte da ficha de ligação para o motor do eixo Y .....	XI
A 3.7	– Suporte das sondas para o eixo Y .....	XII
A 3.8	– Suporte para o carro do barramento .....	XIII
A 3.9	– Suporte da ficha de ligação do motor do eixo X .....	XIV
A 3.10	– Suporte de ligação do barramento à estrutura base .....	XV
A 3.11	– Dimensões gerais da mesa XY .....	XVI
A4	– Exemplo de Código LabVIEW8.6 do <i>Software IOnic</i> .....	XVII





## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Princípio do método de END por CI [4].....	10
Figura 2.2 - Plano de resposta da impedância das CI. [1] .....	10
Figura 2.3 - Profundidade de penetração. [4].....	11
Figura 2.4 - Curvas de profundidade de penetração das CI para diferentes ligas de alumínio [1]. .....	11
Figura 2.5 - Sonda <i>Pencil Probe</i> da Olympus [4]. .....	13
Figura 2.6 - Funcionamento da sonda em modo diferencial [1].....	14
Figura 2.7 - Funcionamento da sonda em modo absoluta [1]. .....	14
Figura 2.8 - Método de análise convencional em comparação com a análise em matriz (à direita) [4]. .....	15
Figura 2.9 - Secção da sonda Cup-core [8]. .....	16
Figura 2.10 - Sondas com as bobinas perpendiculares à superfície de teste: (a) sonda com bobina em cruz; (b) sonda com bobina equiângula [8]. .....	17
Figura 2.11 - - Princípios físicos da sonda com bobina em cruz [8]. .....	17
Figura 2.12 - Sonda Bobinas cruzadas Optimizada [8].....	18
Figura 2.13 - Curva de <i>sputtered epitaxial</i> [110] orientada AF acoplado Co/Cu em multi- camadas para o campo aplicado ao longo da direcção [011] no plano da puper rede. As inserções mostram, esquematicamente, o alinhamento das direcções de magnetização nas camadas de CO. [11] .....	19
Figura 2.14 - Sonda uniforme de correntes induzidas com GMR sobre uma placa de alumínio com defeitos no cordão de soldadura [12]. .....	20
Figura 2.15 - Duas configurações possíveis para as sondas de MWM [6].....	22
Figura 2.16 - (a) Sonda com sete canais de array, (b) sonda permanente em forma de roseta [6]. .....	22
Figura 2.17 - (a) Defeito na raiz do cordão de soldadura; (b) Defeito longitudinal.....	23
Figura 2.18 - Sonda MWM-Array com 37 sensores paralelos.....	23
Figura 2.19 - Esquema de inspecção com a sonda MWM-Array.....	24
Figura 2.20 - Varrimento longitudinal do cordão de SFL.....	24
Figura 2.21 - Varrimento longitudinal do cordão de SFL, com identificação de defeitos do Tipo I e II. ....	25
Figura 2.22 - Varrimento longitudinal do cordão de SFL, com descontinuidades intermitentes planar.....	25
Figura 2.23 - Sistema de correntes induzidas por SQUID [14].....	27
Figura 2.24 - <i>Layout</i> do sensor SQUID [13]. .....	28
Figura 2.25 - Esquema que mostra diferentes maneiras de excitação das bobinas com SQUID [13]. .....	28
Figura 2.26 - Diagrama esquemático da parte electrónica [13].....	29
Figura 2.27 - Sonda IOnic [1] a) Modelação 3D de desenho de conjunto dos vários componentes da sonda, b) Vista de topo do primeiro protótipo construído (30x30 mm e excitação de 55 espiras), c) Vista de cima do segundo protótipo construído (15x15 mm e excitação de 33 espiras). (1-bobina de excitação, 2-bobina sensível espiral plana, 3-substrato, 4-suporte, 5- terminal de ligação).....	30

Figura 2.28 - Princípio de funcionamento da sonda IONic: Correntes eléctricas e campos magnéticos envolvidos a) Sonda no ar, b) Sonda sobre material homogéneo, c) Sonda sobre defeitos. ....	31
Figura 2.29 - Circulação das CI nas imediações de defeitos paralelos e perpendiculares à superfície a) CI da sonda axissimétrica junto do defeito paralelo, b) CI da sonda axissimétrica junto do defeito perpendicular c) CI da sonda IONic junto do defeito paralelo, d) CI da sonda IONic junto do defeito perpendicular. ....	34
Figura 2.30 - Representação esquemática das correntes e campos nas sondas IONic e convencionais. ....	34
Figura 2.31 - Representação esquemática do método de inspecção baseado no movimento de rotação da sonda de 360°, com ou sem excentricidade relativamente à direcção dos defeitos; ..	36
Figura 3.1 - IONic <i>Probe</i> com os principais parâmetros identificados. ....	38
Figura 3.2 - Matriz das relações. ....	42
Figura 3.3 - Gráfico ilustrativo dos conceitos de amplitude e <i>spread</i> , os pontos A e C são a projecção dos pontos B e D no eixo das abcissas respectivamente. ....	43
Figura 4.1 - Modelo geométrico utilizado para simulação dos fenómenos electromagnéticos das sondas IONic. ....	47
Figura 4.2 - Vista em corte da malha, num quarto do volume ar/material, e representação do defeito. ....	47
Figura 4.3 - Representação das bobinas sensíveis, filamento de excitação e do defeito visto de topo. ....	48
Figura 4.4 - Intensidade do campo magnético produzido pelo filamento de excitação com $I = 1$ A. ....	48
Figura 4.5 - Campo vectorial das CI provocado pela sonda IONic no plano $Z = 0$ mm com $f = 100$ KHz com um desfaseamento de 90° relativamente à corrente de excitação. ....	49
Figura 4.6 - Valor absoluto das CI da sonda IONic no plano $Z=0$ mm com $f=100$ KHz e fase de 90 graus. ....	50
Figura 4.7 - Efeito do tamanho do bloco para uma frequência de 100 KHz. ....	52
Figura 4.8 - Efeito do tamanho do bloco para uma frequência de 1 MHz. ....	52
Figura 4.9 - Bloco de material base e sonda IONic envolvidos num bloco com as propriedades eléctricas do ar. ....	53
Figura 4.10 - Comparação do campo vectorial das CI provocadas pela sonda IONic. a) Linhas do campo vectorial perpendiculares as faces laterais do bloco de material base (sem ar nas laterais). b) Linhas do campo vectorial paralelas as faces laterais do bloco de material base (com ar nas laterais). ....	54
Figura 4.11 - Comparação do deslocamento da sonda IONic sobre um defeito de 15 $\mu\text{m}$ e 300 $\mu\text{m}$ , para uma frequência de 100 KHz. ....	55
Figura 4.12 - Comparação do deslocamento da sonda IONic sobre um defeito de 15 $\mu\text{m}$ e 300 $\mu\text{m}$ , para uma frequência de 1000 KHz. ....	55
Figura 4.13 - Deslocamento da sonda IONic sobre o defeito de 15 $\mu\text{m}$ , para uma frequência de 1 MHz. ....	56
Figura 4.14 - Variação das frequências. ....	57
Figura 4.15 - Efeito da variação do <i>lift-off</i> para as frequências de 10, 100 e 1000 KHz. ....	58
Figura 4.16 - Representação pormenorizada do início das três curvas de <i>lift-off</i> . ....	59
Figura 4.17 - Efeito da variação da corrente para as frequências de 10, 100 e 1000 KHz. ....	60
Figura 4.18 - Representação pormenorizada do início das três curvas da corrente. ....	60
Figura 4.19 - Efeito E1 @ $f = 10$ KHz. ....	61
Figura 4.20 - Efeito E1 @ $f = 100$ KHz. ....	62

Figura 4.21 - Efeito E1 @ $f = 1000$ KHz. ....	62
Figura 4.22 - Efeito E2 @ $f = 10$ KHz. ....	63
Figura 4.23 - Efeito E2 @ $f = 100$ KHz. ....	64
Figura 4.24 - Efeito E2 @ $f = 1000$ KHz. ....	64
Figura 4.25 - Efeito E3 @ $f = 10$ KHz. ....	65
Figura 4.26 - Efeito E3 @ $f = 100$ KHz. ....	65
Figura 4.27 - Efeito E3 @ $f = 1000$ KHz. ....	66
Figura 4.28 - Efeito B1 @ $f = 10$ KHz. ....	67
Figura 4.29 - Efeito B1 @ $f = 100$ KHz. ....	67
Figura 4.30 - Efeito B1 @ $f = 1000$ KHz. ....	68
Figura 4.31 - Efeito B2 @ $f = 10$ KHz. ....	69
Figura 4.32 - Efeito B2 @ $f = 100$ KHz. ....	69
Figura 4.33 - Efeito B2 @ $f = 1000$ KHz. ....	70
Figura 4.34 - Efeito B3 @ $f = 10$ KHz. ....	71
Figura 4.35 - Efeito B3 @ $f = 100$ KHz. ....	71
Figura 4.36 - Efeito B3 @ $f = 1000$ KHz. ....	72
Figura 4.37 - Componente imaginária das quatro melhores sondas IOnic ao longo de um defeito para uma frequência de 10 KHz. ....	73
Figura 4.38 - Componente imaginária das oito restantes sondas IOnic ao longo de um defeito para uma frequência de 10 KHz. ....	74
Figura 4.39 - Componente imaginária das quatro melhores sondas IOnic ao longo de um defeito para uma frequência de 100 KHz. ....	74
Figura 4.40 - Componente imaginária das oito restantes sondas IOnic ao longo de um defeito para uma frequência de 100 KHz. ....	75
Figura 4.41 - Componente imaginária das quatro melhores sondas IOnic ao longo de um defeito para uma frequência de 1000 KHz. ....	75
Figura 4.42 - Componente imaginária das oito restantes sondas IOnic ao longo de um defeito para uma frequência de 1000 KHz. ....	76
Figura 5.1 - Representação esquemática do sistema global de END por CI [1]. ....	81
Figura 5.2 - Projecto da sonda IOnic número #11 ....	82
Figura 5.3 - Projecto da sonda IOnic. a) Sonda IOnic #12 com o filamento de excitação a 200 $\mu\text{m}$ . b) Sonda IOnic #3 com o filamento de excitação a 1400 $\mu\text{m}$ . ....	83
Figura 5.4 - Representação do aspecto final da sonda IOnic no <i>Software Altium Designer 2009</i> . ....	84
Figura 5.5 - Novas sondas IOnic produzidas. a) Sonda IOnic #2, b) Sonda IOnic #3, c) Sonda IOnic #6, d) Sonda IOnic #9, e) Sonda IOnic #11, f) Sonda IOnic #12. ....	85
Figura 5.6 - Esquema representativo das configurações passíveis da mesa XY. ....	87
Figura 5.7 - a) Representação esquemática em desenho 3D da sonda planar acoplada á mesa. b) Foto da sonda planar acoplada a mesa XY. ....	88
Figura 5.8 - a) Representação esquemática em desenho 3D da sonda em substrato de Kapton acoplada á mesa. b) Foto da sonda em substrato Kapton acoplada a mesa XY. ....	88
Figura 5.9 - a) Representação esquemática em desenho 3D da sonda <i>Pencil Probe</i> acoplada á mesa. b) Foto da sonda <i>PencilProbe</i> acoplada a mesa XY. ....	88
Figura 5.10 - Configurações dos pés da mesa. ....	89
Figura 5.11 - Estrutura base da mesa, com os pés simplesmente apoiados. ....	90
Figura 5.12 - Estrutura base da mesa, com matriz acoplada aos pés. ....	90

Figura 5.13 - Estrutura base da mesa com ventosas no lugar dos pés rígidos. a) Representação esquemática dos quatro pés com ventosas incorporadas. b) Foto da mesa com as ventosas montadas no lugar dos pés rígidos, numa situação de inspecção no plano vertical. ....	90
Figura 5.14 - a) Representação esquemática em desenho 3D da mesa na sua configuração mais completa (eixo X e Y). b) Réplica da mesa desenvolvida em Solidworks.....	92
Figura 5.15 - Vista traseira da mesa. a) Motor passo a passo, b) correia .....	92
Figura 5.16 - Eixo Y da mesa. a) Motor passo a passo, b) veio roscado M3.....	93
Figura 5.17 – Representação da mesa XY sobre uma folha A4 para ter um factor de escala, que permite perceber as dimensões da mesa.....	93
Figura 5.18 - Placa Principal em PCB do dispositivo eléctrico (ECscan).....	95
Figura 5.19 - a) Placa de excitação da sonda IOnic em PCB com dimensões 108x40 mm. b) Placa de aquisição de dados da sonda IOnic em PCB com dimensões 108x30 mm. c) Placa de movimentação da sonda IOnic em PCB com as dimensões 108x50 mm.....	95
Figura 5.20 – Janela de inicialização do <i>Software</i> . A: Posicionamento e precisão de deslocamento das sondas, definição da origem do referencial B: Velocidade e direcção do deslocamento das sondas, definição do deslocamento em X e a sua resolução C: Definição do método de medição e de excitação das sondas e da frequência. D: Visualização em tempo real dos dados adquiridos em gráficos de componentes real e imaginária.....	96
Figura 5.21 - Janela de inspecção automática. A: quatro menus do <i>Software</i> composto por janelas de início, teste, análise e ajuda B: Escolha da sonda em teste, da frequência, da amplitude e do ganho da sonda C: Definição do deslocamento de X e Y, a sua resolução para realizar a inspecção automática D: Visualização em tempo real dos dados adquiridos em gráfico com parte real e imaginária E: Visualização em tempo real dos dados adquiridos em gráfico para as inspecções nos dois eixos.....	97
Figura 6.1 - Padrão em alumínio contendo um conjunto de defeitos diversificados, produzidos por electroerosão. a) Vista semitransparente da localização dos vários defeitos paralelos à superfície, perpendiculares à superfície e defeitos em rampa [1], b) Padrão (300x80x40 mm) com sistema de locomoção da sonda IOnic.....	101
Figura 6.2 - Procedimento de inspecção do defeito padrão com o sistema de END desenvolvido a) Sentido do deslocamento da sonda sobre o defeito padrão, b) Pormenor do calço da sonda sobre o material. ....	102
Figura 6.3 – Suporte das sondas em PMMA. a) suporte onde se mostra as cavidades de passagem dos fios de ligação para as bobinas sensíveis e para o filamento de excitação. b) suporte com a sonda acoplada. ....	102
Figura 6.4 – Resultados experimentais e numéricos do sinal da sonda #2, apresenta-se três sinais, são eles: experimental; numérico ajustável e numérico real. a) Sinal da sonda #2 para uma frequência de 100 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 1.44. b) Sinal da sonda #2 para uma frequência de 1000 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 2.19.....	103
Figura 6.5 – Resultados experimentais e numéricos do sinal da sonda #3, apresenta-se três sinais de sonda, são eles: experimental; numérico ajustável e numérico real. a) Sinal da sonda #3 para uma frequência de 100 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 1.34 b) Sinal da sonda #3 para uma frequência de 1000 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 1.96.....	104
Figura 6.6 - Resultados experimentais e numéricos do sinal da sonda #6, apresenta-se três sinais de sonda, são eles: experimental; numérico ajustável e numérico real. a) Sinal da sonda #6 para uma frequência de 100 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com	

um factor de 2.21. b) Sinal da sonda #6 para uma frequência de 1000 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 3.24.....	104
Figura 6.7 - Resultados experimentais e numéricos do sinal da sonda #9, apresenta-se três sinais de sonda, são eles: experimental; numérico ajustável e numérico real. a) Sinal da sonda #9 para uma frequência de 100 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 1.16. b) Sinal da sonda #9 para uma frequência de 1000 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 2.68.....	105
Figura 6.8 - Resultados experimentais e numéricos do sinal da sonda #11, apresenta-se três sinais de sonda, são eles: experimental; numérico ajustável e numérico real. a) Sinal da sonda #9 para uma frequência de 100 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 1.47. b) Sinal da sonda #9 para uma frequência de 1000 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 2.10.....	105

Figura A 1 – Caracterização do Bloco de Alumínio no <i>Software</i> CST Studio Suite. a) Propriedades gerais do bloco de MB, definição da cor, do nome do material e de alguns aspectos visuais. b) Valor da condutividade do MB. ....	III
Figura A 2 – a) Propriedades térmicas do MB no <i>Software</i> CST Studio Suite. b) Propriedades mecânicas do MB. ....	IV
Figura A 3 – Densidade do material Base no <i>Software</i> CST Studio Suite.....	IV
Figura A 4 - Caracterização do Bloco de Ar no <i>Software</i> CST Studio Suite. a)Propriedades gerais do bloco de Ar, onde se define o nome do material e aspectos visuais. b) Condutividade do Ar. c) Dispersão do ar mostrando a componente magnética e dieléctrica. d) Propriedades térmicas do Ar. e) Propriedades mecânicas do ar. f) Densidade do ar. ....	V
Figura A 5 – Desenho técnico do apoio da roldana .....	VI
Figura A 6 – desenho técnico do suporte do motor do eixo X.....	VII
Figura A 7 – desenho técnico do suporte do motor do eixo Y.....	VIII
Figura A 8 – Desenho técnico do suporte que liga o barramento à estrutura base em perfil Bosch .....	IX
Figura A 9 – Desenho técnico do suporte das sondas principais .....	X
Figura A 10 – Desenho técnico do suporte da ficha para o motor do eixo Y .....	XI
Figura A 11 – Desenho técnico do suporte das sondas para o eixo Y.....	XII
Figura A 12 – Desenho técnico do suporte que encaixa no carro do barramento e que permite ligar as diferentes peças que suportam as sondas.....	XIII
Figura A 13 – Desenho técnico do suporte da ficha de ligação para o motor do eixo X .....	XIV
Figura A 14 – Desenho técnico do suporte de ligação do barramento à estrutura base .....	XV
Figura A 15 – Desenho técnico onde se apresenta as medidas gerais da mesa XY desenvolvida .....	XVI

Figura A 16 – Exemplo de Código LabVIEW8.6 do <i>Software</i> IOnic.....	XVII
--	------

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Apresentação das alterações a submeter aos parâmetros e respectiva representação na matriz.....	39
Tabela 3.2 - Matriz das sondas.....	40
Tabela 3.3 - Matriz que esquematiza as doze sondas e mostra os atributos principais de cada sonda. ....	41
Tabela 4.1 - Matriz das simulações, permite perceber individualmente o efeito das condições e dos parâmetros de inspecção. ....	51
Tabela 5.1 – Características eléctricas e físicas das seis sondas produzidas em PCB .....	86
Tabela 5.2 – Características da mesa XY desenvolvida.....	91
Tabela T 1 - Profundidade de penetração de 36.8% e a gama de frequências passível de utilizar. ....	II





# NOMENCLATURA

## Nomenclatura Romana

$\vec{Z}$  Vector impedância eléctrica [ $\Omega$ ]

$f$  Frequência [Hz]

$Im(\vec{Z})$  Parte imaginária do vector impedância eléctrica [ $\Omega$ ]

$Re(\vec{Z})$  Parte real do vector impedância eléctrica [ $\Omega$ ]

X,x Comprimentos

## Nomenclatura Grega

$\emptyset$  Diâmetro [m]

$\delta$  Profundidade de penetração das correntes induzidas [m]

$\theta$  Ângulo [rad]

$\rho$  Densidade mássica [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$\sigma$  Condutividade eléctrica [ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ] ou [%IACS]

$\mu$  Permeabilidade [ $\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$\varphi$  Fase eléctrica [rad]



## Siglas

AA	<i>Aluminium Alloy</i>
BoP	<i>Bead on plate</i> (soldadura em MB sem juntas separadas)
CAD	<i>Computer Assisted Design</i>
CI	Correntes Induzidas
CST	<i>Computer Simulation Technology</i>
DAQ	<i>Data acquisition</i>
DC	<i>Direct Currents</i>
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
EC	<i>Eddy Currents</i>
ECA	<i>Eddy Currents Array</i>
END	Ensaaios Não Destrutivos
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
GLARE®	<i>GLAss-REinforced Fibre Metal Laminate</i>
GMR	<i>Giant Magnetoresistance</i>
IACS	<i>International Organization for Standarization</i>
ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
IST	Instituto Superior Técnico
LTI	Laboratório de Tecnologia Industrial
MB	Material Base
MWM	<i>Meandering Winding Magnetometer</i>
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>

PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PEC	<i>Pulsed Eddy Currents</i>
PMMA	polimetil-metacrilato
PoD	<i>Probability of Detection</i>
SFL	Soldadura por Fricção Linear
SQUID	<i>Superconducting Quantum Interference Devices</i>

# **1 - INTRODUÇÃO**

## **1.1 - Estado da Arte e Motivação**

Os Ensaios Não Destrutivos (END) têm um papel crucial no processo de gestão da qualidade ao garantirem a fiabilidade de uma vasta gama de componentes que vão desde aplicações aeroespaciais, rodoviárias e ferroviárias a indústrias químicas e petrolíferas. Dos vários métodos de análise não destrutiva, o ensaio por CI estão a ganhar o seu espaço no que diz respeito à inspecção de componentes metálicos e de soldadura com o objectivo de localizar defeitos e outras descontinuidades nos materiais.

Em 2007 e 2008 Santos T. et al. Desenvolveram um conceito inovador de sonda de Correntes Induzidas designada *IONic Probe* [1],[2]. Esta nova configuração de sonda demonstrou um bom desempenho comparativamente às sondas convencionais de CI [3], [4], [5]. Vários resultados experimentais revelaram também a capacidade de detecção de micro-defeitos na raiz

da SFL [6], [7], [8]. Apesar do bom desempenho desta configuração de sonda, a sua geometria nunca foi alvo de uma optimização sistemática e aprofundada.

Vários desenvolvimentos teóricos e tecnológicos têm sido realizados em torno deste conceito de sonda, mas ainda não é conhecido com o rigor desejável qual o efeito de cada um dos parâmetros geométricos no sinal produzido pela sonda.

O ensaio por CI baseia-se na geração e análise de correntes eléctricas no material a testar. A correcta aplicação deste método pode contribuir para a prevenção de acidentes, promovendo assim a preservação de vidas, protecção do ambiente e ainda para evitar prejuízos económicos.

Diferentes materiais e diferentes tecnologias de produção têm diferentes necessidades de Ensaios Não Destrutivos, assim sendo, como se pretende inspeccionar componentes estruturais com alto nível de garantia de qualidade, por exemplo processado por soldadura por fusão ou no estado sólido, têm necessidades de inspecção com alta fiabilidade na detecção de micro-defeitos, por exemplo na ordem dos 100  $\mu\text{m}$ . Para estes tipos de aplicações têm sido desenvolvidas e implementadas as técnicas de END por CI, são estas: CI pulsadas [9], CI de array [10] [11], MWM [11], SQUID [12], GMR [13] [14] [15].

A presente dissertação incide na inspecção não destrutiva de componentes estruturais de elevada responsabilidade, produzidos por tecnologias de produção das quais podem resultar micro-defeitos, onde a sua detecção e dimensionamento é importante. Um exemplo dessas aplicações é a soldadura por Fricção Linear (SFL), um processo tecnológico com um desenvolvimento técnico consolidado e com um campo de aplicação industrial muito diversificado e em crescente. No entanto, perdura a possibilidade de ocorrência de alguns defeitos, com especial destaque para os defeitos na raiz do cordão de soldadura [6].

## **1.2 - Resumo Alargado**

### **1.2.1 - Objectivos Tecnológicos e Científicos**

O objectivo deste trabalho foi optimizar a geometria da sonda IOnic para melhorar a qualidade do seu sinal e aumentar a eficácia na detecção de pequenos e micro-defeitos.

Este objectivo tecnológico visa sobretudo o desenvolvimento ao nível das sondas de CI, mas também ao nível dos meios de locomoção automatizada das sondas. Da ligação destes desenvolvimentos resultará um sistema integrado de END, cujo propósito é aumentar a fiabilidade do sistema existente, para realizar inspecções não destrutivas na SFL, de acordo com os critérios *Provability of Detection* (PoD) e *Relative Operating Characteristic* (ROC).

Este novo sistema de END, como já acontecia no anterior, será concebido com o objectivo de reduzir nomeadamente, o limiar da detectabilidade dos pequenos e micro-defeitos da raiz da SFL.

Com o presente trabalho pretendem-se alcançar também dois objectivos científicos principais, o primeiro vai permitir compreender melhor os fenómenos eléctricos e magnéticos envolvidos no funcionamento da sonda IOnic, e o segundo perceber a importância dos vários parâmetros da sonda IOnic.

- 1) Compreender melhor os fenómenos eléctricos e magnéticos envolvidos no funcionamento das novas sondas IOnic, para melhor entender os parâmetros que devem ser alterados e que valores podem trazer melhores resultados.
- 2) Estudar aprofundadamente os parâmetros seleccionados como principais e perceber o contributo da sua alteração na detecção dos pequenos e micro-defeitos. Perceber qual o parâmetro geométrico mais influente na configuração da sonda IOnic e aquele que ao ser alterado não traz ganhos significativos.

### **1.2.2 - Trabalhos Realizados**

Com o intuito de cumprir os objectivos traçados, começou-se por realizar uma pesquisa bibliográfica nas áreas de SFL e END por CI. Destaca-se também a experiência adquirida anteriormente na disciplina de Tecnologia Mecânica IV, onde se abordou com bastante preponderância, o tema de END por CI.

Posteriormente estabeleceram-se os parâmetros importantes na configuração da sonda IOnic, e criou-se uma matriz onde se pode observar as diferentes configurações de sonda que se vai simular. Esta simulação foi o passo seguinte. Criaram-se as diferentes configurações das sondas e realizaram-se as simulações numéricas com o objectivo de identificar as que melhor comportamento apresenta.

Com as sondas seleccionadas, foi necessário criar os seus modelos físicos, para tal desenvolveram-se os modelos das sondas (estes foram realizados em PCB), com o objectivo de validar as simulações numéricas anteriormente realizadas, e caracterizar cada uma das sondas.

Para se realizarem estes ensaios, foi necessário desenvolver um sistema de locomoção e aquisição de dados, este foi o passo seguinte que permitiu então realizar inspecções em provete que continham defeitos padrão como os analisados numericamente, e assim validar as novas configurações de sonda.

Após a concepção do sistema, a avaliação experimental procedeu-se de uma maneira natural, avaliando-se uma a uma as sondas que apresentavam melhor comportamento.

### **1.2.3 - Resultados Obtidos e Conclusões**

Os resultados da validação experimental foram concordantes com a simulação numérica. Foi possível compreender a influência de cada parâmetro geométrico no sinal da sonda e determinar a sua configuração óptima. Dos seis parâmetros geométricos considerados os que têm uma maior influência no sinal da sonda IOnic são: a espessura e espaçamento das espiras sensíveis; a posição do filamento de excitação em Z; o comprimento do filamento de excitação.

Os meios de inspecção laboratoriais desenvolvidos mostraram-se adequados aos requisitos estabelecidos, nomeadamente no que diz respeito à versatilidade, portabilidade, precisão e rapidez da inspecção.

## **1.3 - Estrutura da Tese**

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos, ao longo dos quais se faz referência as diversas matérias tratadas.

No Capítulo 2 apresenta-se o resultado da pesquisa bibliográfica, onde se pretende mostrar os estudos existentes referentes aos END por CI. Esta pesquisa encontra-se dividida em três partes distintas. Em § 2.2 aborda-se os END do ponto de vista global, em § 2.3 explica-se o conceito base das Correntes Induzidas, e em § 2.4 apresentam-se os principais desenvolvimentos e trabalhos realizados por outros autores nos END por CI na SFL e em geral.



No Capítulo 3 apresenta-se a metodologia utilizada para otimizar os parâmetros da sonda, este estudo preliminar é importante, pois é dele que resulta uma melhor compreensão dos parâmetros mais relevantes. O capítulo encontra-se dividido em três partes. No § 3.2 apresenta-se os parâmetros principais da sonda IONic e o intervalo de valores entre os quais estes parâmetros vão variar. Em § 3.3 apresenta-se uma matriz que descreve melhor os parâmetros da sonda e mostra-se esquematicamente por meio de imagens as alterações em cada sonda. Em § 3.4 apresenta-se a matriz das relações que permite perceber quais as sondas que devem ser comparadas para ser avaliado cada parâmetro individualmente.

Quando traduzida graficamente essa avaliação possibilita uma melhor percepção individual do parâmetro em causa. Por fim, em § 3.5 explanam-se os conceitos de amplitude e *spread* aplicados aos gráficos do sinal das sondas.

O Capítulo 4 compreende a modelação numérica e mostra-se o comportamento dos fenómenos eléctricos e magnéticos envolvidos no funcionamento da sonda IONic, assim o capítulo encontra-se dividido em três partes. Em § 4.2 descreve-se o modelo utilizado nas simulações das diferentes configurações de sonda, bem como todos os parâmetros envolvidos. Em § 4.3 a estratégia adoptada para se realizar as simulações é descrita pormenorizadamente, apresentando uma matriz que define padrões de inspecção para as condições de inspecção e para os parâmetros de inspecção, é avaliado efeito a efeito e assume-se um padrão para se realizar as inspecções das doze configurações de sonda. De § 4.4 a § 4.9 são apresentados, separadamente, os efeitos dos parâmetros descritos na matriz das sondas, a importância de cada um no sinal da mesma e as sondas que permitem estudar individualmente esses parâmetros.

Por fim em § 4.10 apresenta-se graficamente o sinal (para três frequências) das doze sondas estudadas destacando-se as quatro sondas com melhores resultados.

No Capítulo 5 descreve-se o desenvolvimento do novo sistema de END por CI, para a detecção de micro-defeitos superficiais e subsuperficiais. O capítulo encontra-se dividido em quatro partes importantes. Em § 5.3 descreve-se como se realizou a produção das sondas IONic e apresenta-se as sondas que foram concebidas num modelo físico. Em § 5.4 caracterizam-se os protótipos das sondas desenvolvidas. Em § 5.5 apresenta-se o dispositivo automatizado que permite realizar a locomoção das sondas sobre o defeito. Em § 5.6 mostra-se os dispositivos electrónicos utilizados, que fazem as sondas se deslocar sobre os defeitos, e permitem injectar um sinal na sonda e recepcionar o sinal de volta por parte das bobinas sensíveis da sonda. Por fim em § 5.7, todo o *Software* desenvolvido, que permite controlar este novo sistema de END, criando numa linguagem G, no ambiente LabView.

No capítulo 6 apresenta-se a validação experimental do sistema de END por Correntes Induzidas. Em § 6.2 comparam-se os resultados do teste do sistema em condições de defeito padrão com os resultados numéricos obtidos por meio do *Software* CST Studio Suite.

As conclusões gerais ao trabalho realizado e as propostas para possíveis desenvolvimentos e otimizações futuras são apresentadas no Capítulo 7.

## **2 - REVISÃO DO ESTADO DA ARTE**

### **2.1 - Introdução**

Neste capítulo apresenta-se a pesquisa bibliográfica realizada para a presente dissertação. O intuito foi enquadrar os desenvolvimentos realizados nos capítulos seguintes, na área dos Ensaio Não Destrutivos por Correntes Induzidas. Aborda-se então o estado da arte das principais matérias envolvidas na tese, ou seja os END por CI, as variantes mais avançadas destes ensaios, e em particular a sonda IOnic.

Descreve-se as várias técnicas de END (§ 2.4), onde se aprofunda os fundamentos e as suas limitações, dando uma maior relevância a IOnic *Probe* (§ 2.4.7).

## **2.2 - Ensaios Não Destrutivos (END)**

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são passíveis de realizar em materiais acabados ou semi-acabados, através de princípios físicos definidos, estes permitem verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos salvaguardando o material, isto é, sem que este sofra alterações nas suas características físicas, químicas, mecânicas e dimensionais permitindo assim a sua posterior utilização. Estes ensaios constituem uma das principais ferramentas de controlo da qualidade de materiais e produtos uma vez que garantem a qualidade dos mesmos, permitem a redução dos custos dos ensaios e aumentam a confiabilidade da inspecção.

Apesar de maioritariamente aplicáveis na inspecção de componentes em manutenção, os Ensaios Não Destrutivos são também utilizados na inspecção em serviço (visando sobretudo os cordões de soldadura).

Estes ensaios estão em grande evidência e propensão na indústria petroquímica, nuclear, aeroespacial, siderúrgica, ferroviária, naval, automóvel, etc.

Um claro entendimento sobre a necessidade de realizar um Ensaio Não Destrutivo é o pré requisito para que a inspecção de um componente seja cumprida, utilizando o método mais adequado [3], [16], [17].

## **2.3 - Correntes Induzidas (CI)**

Em 1851, um físico francês de nome Léon Foucault (18 Setembro 1819 – 11 Fevereiro 1868), constituiu um dispositivo que usava um disco de cobre em movimento num campo magnético forte, para mostrar que as correntes de Foucault eram geradas quando um material se movia dentro de um campo magnético aplicado. Estas correntes, adquirem o nome de correntes *eddy* quando os estudos são realizados em Inglaterra, contudo o nome correntes induzidas é o correcto para o uso científico, baseiam-se nas deduções levadas a cabo 20 anos antes pelos cientista inglês Michael Faraday (22 Setembro 1791 — 25 Agosto 1867).

Faraday descobriu que quando um campo magnético passa através de um condutor (material onde os electrões se movem facilmente) ou quando o condutor passa por um campo magnético, uma corrente eléctrica flui através desse condutor se houver um caminho fechado por onde esta possa circular.

Já em 1879 o cientista inglês David Hughes (16 Maio 1831 – 22 Janeiro 1900) deu um grande impulso a esta área ao demonstrar que as propriedades de uma bobina mudam quando

esta é colocada em contacto com um material de diferente condutividade eléctrica e permeabilidade magnética. Contudo só cerca de meio século depois, durante a segunda guerra mundial, é que novos desenvolvimentos surgiram no campo das correntes induzidas.

No começo dos anos trinta, o Professor Alemão Friedrich Forster que na altura trabalhava no Kaiser-Wilhelm-Institute, introduziu as correntes eddy na indústria ao desenvolver instrumentos que visavam a medição da condutividade, no entanto os maiores avanços deram-se durante os anos 50 e 60 com a evolução da indústria aeronáutica e nuclear.

Com o passar dos anos as tecnologias de detecção de defeitos e processamento de dados têm despontado, e actualmente ensaios que usam o método das correntes induzidas são reconhecidos como ensaios rápidos, simples e precisos.

A tecnologia está presente e é imprescindível numa vasta área da indústria mundial, e com isso novas matérias surgem para inspeccionar, como alumínio, aço inox, cobre, titânio, bronze, aço carbono e Inconel ® entre outros [3], [10].

### 2.3.1 - Fundamentos do método de END por CI

A geração de correntes induzidas é conseguida quando a uma bobina se impõe uma corrente eléctrica alternada criando-se assim um campo magnético (campo primário) como esquematizado na Figura 2.1 caso (a). Na situação específica em que a bobina é colocada sobre uma peça condutora, para além do campo magnético primário criado são induzidas na peça correntes eléctricas alternadas denominadas correntes *eddy* ou induzidas (Figura 2.1 (b)).

Estas correntes induzidas criam um campo magnético secundário que contraria o campo magnético primário induzindo uma corrente na bobina constituinte da sonda.

Nesta situação, tanto a corrente primária como o campo magnético primário reduzem-se comparativamente aos obtidos na ausência da peça. Esta redução é equivalente ao aumento das resistências e à alteração da indutância o que no plano da resposta da impedância se traduz na trajectória *lift-off* (Figura 2.2).

Uma vez que os defeitos presentes na peça vão perturbar a trajectória das correntes induzidas, que pode ser desviada ou limitada, o efeito de oposição destas correntes ao campo primário pode ficar comprometido, traduzindo-se esta alteração numa variação da impedância da bobina (Figura 2.1 C)) [3].

Esta variação da impedância na bobina permite não só estudar a permeabilidade magnética mas também detectar defeitos e corrosão.

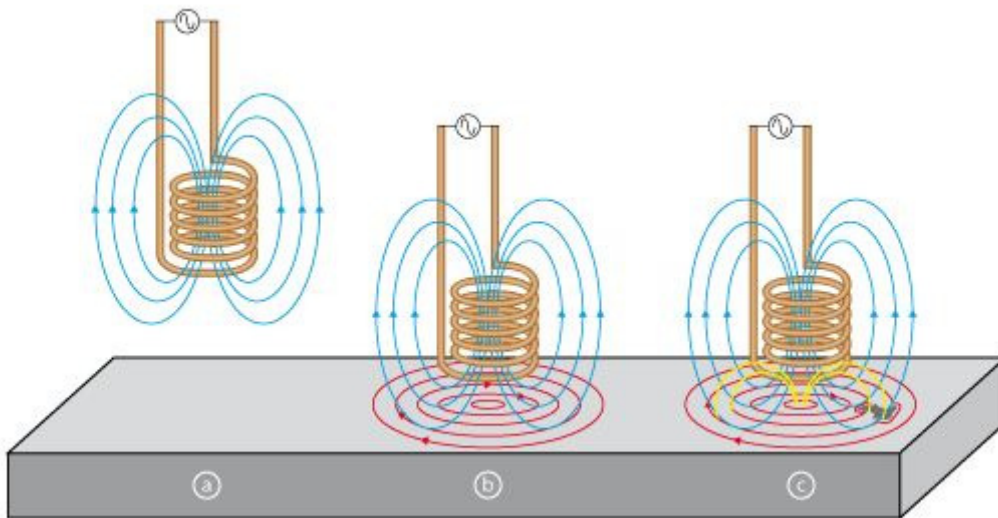


Figura 2.1 - Princípio do método de END por CI [10]

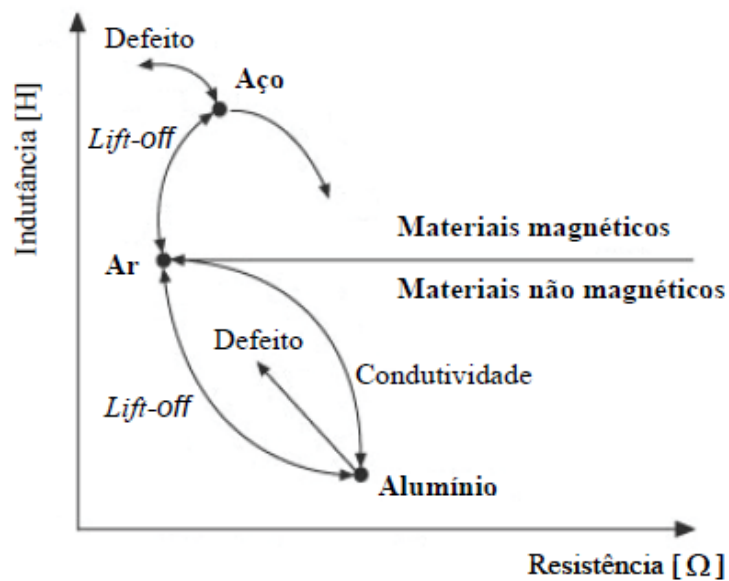


Figura 2.2 - Plano de resposta da impedância das CI. [3]

A densidade das correntes eddy não se mantém constante em todas as profundidades de um material. A densidade é maior na superfície e decresce exponencialmente com a profundidade, fenómeno este que é conhecido por “efeito pele”. A profundidade padrão é dada pela Equação 2.1 que explica porque a profundidade de penetração  $\delta$  [m] das correntes eddy diminui com o aumento da frequência  $f$  [ $s^{-1}$ ], da condutividade  $\sigma$  [%IACS] e da permeabilidade  $\mu$  [ $H \cdot m^{-1}$ ]. Para um material em que a espessura é uniforme, a profundidade

padrão de penetração é a profundidade na qual o campo eddy é 37% do valor da superfície do material (Figura 2.3) [3].

$$\delta_{(f,\mu,\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \text{ [m]} \quad (2.1)$$

Quando se pretendem detectar defeitos superficiais de pequena dimensão nos materiais é indicado o uso de altas frequências, estas podem variar entre 10 KHz e 10<sup>4</sup> KHz (Figura 2.4), e permitem ainda revelar defeitos em materiais magnéticos altamente condutores ou com espessuras elevadas, já as baixas frequências são utilizadas para detectar defeitos subsuperficiais (Anexo A1).

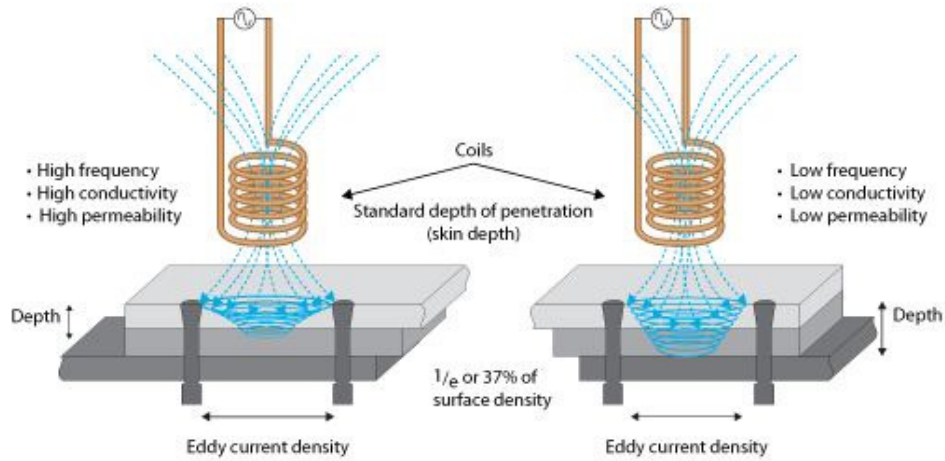


Figura 2.3 - Profundidade de penetração. [10]

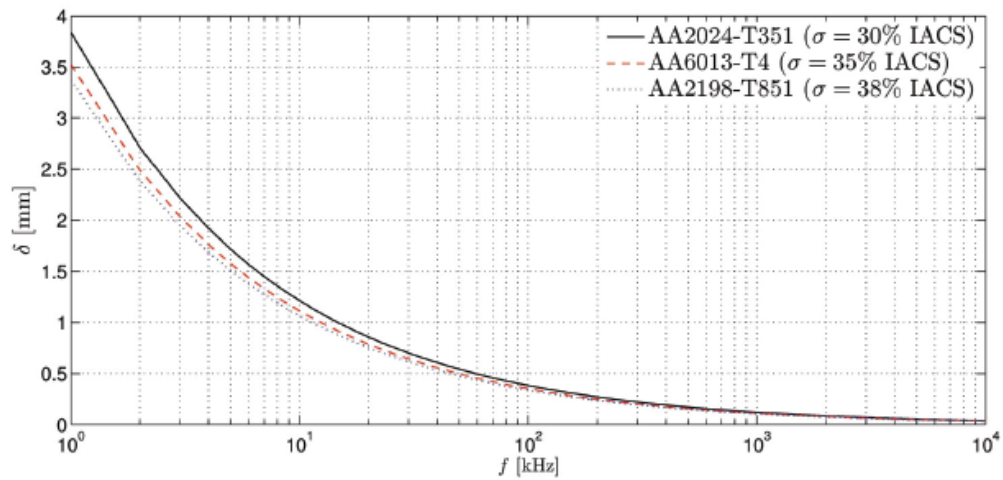


Figura 2.4 - Curvas de profundidade de penetração das CI para diferentes ligas de alumínio [3].

### 2.3.2 - Limitações do método

Um dos principais obstáculos a este método prende-se com o facto de os materiais a inspeccionar terem de ser condutores de electricidade e ao facto de as correntes induzidas só existirem à superfície dos materiais a inspeccionar.

Outra grande limitação prende-se com a geometria a inspeccionar: uma sonda não acoplada paralelamente à superfície do material, mostra uma variação no seu sinal (impedância eléctrica  $Z$ ) denominada por *lift-off*. Se o defeito for de dimensão ou morfologia de difícil detecção, então a variação da impedância devida ao *lift-off* pode ser superior à variação devida à diminuição da condutividade pela existência desse defeito. Assim sendo, o sinal provocado pelo defeito não é observado pois é absorvido pelo sinal do *lift-off* o que impossibilita a localização do defeito e o seu dimensionamento.

Dada a limitação imposta pelo *lift-off* ao método das CI, é prática comum seleccionarem-se os parâmetros de funcionamento da sonda que provocam um aumento do ângulo de separação entre a linha de *lift-off* e a linha de condutividade [3].

## 2.4 - Variantes do método e de Sondas

### 2.4.1 - Método convencional (sondas axissimétricas e helicoidais)

As sondas helicoidais cilíndricas são normalmente utilizadas para a detecção de defeitos na superfície dos materiais, estas sondas são também conhecidas como sondas de alta frequência de correntes eddy (HFEC). Estas sondas têm uma pequena bobina que pode ou não estar blindada. A maioria das sondas contém uma bobina integrada no seu corpo que garante o aumento da faixa de frequência. Existem muitos tipos de sondas, tanto rectas como angulares, cada uma delas serve para fazer face às exigências de inspecção. Estas sondas também existem com hastes flexíveis, com a capacidade de se adaptarem a diferentes geometrias de inspecção.



A projecção destas sondas é feita para operar em diferentes frequências, o que faz variar esta frequência é principalmente o material a ser testado, assim para alumínio tipicamente utiliza-se 100 KHz, mas pode ser elevar a frequência até aos 200 KHz ou mais, o limite é aproximadamente 500 KHz, mas com essa frequência a sonda torna-se mais sensível e pouco penetrante, por esta razão costuma-se realizar o ensaio com frequências tão baixas quanto possível.

Para materiais de baixa condutividade, como o titânio ou aços inoxidáveis é necessário uma frequência de 1 a 2 MHz para melhorar a sensibilidade da sonda na detecção dos defeitos. Para aços magnéticos as frequências não são críticas, podendo ser usadas as mesmas frequências com o objectivo de minimizar as variações de permeabilidade. Quando temos materiais com tratamento superficial (galvanização<sup>1</sup>), as frequências baixas são as mais indicadas sendo normalmente utilizada uma gama de frequências que varia entre os 25 e os 50 KHz.

A configuração de sondas mais convencional para geração de correntes induzidas é através da utilização de sondas do tipo absoluta (Figura 2.5). Estas sondas são constituídas por uma única bobina que é ao mesmo tempo o elemento de excitação e de recepção (Figura 2.7). Neste tipo de sondas pode-se analisar a variação de impedância total da bobina, através da geração (*output*) de um gráfico que nos mostra numa única curva o defeito [3], [10].



Figura 2.5 - Sonda *Pencil Probe* da Olympus [10].

Outra configuração usual para a geração de correntes induzidas é a que utiliza as sondas de funcionamento diferencial. Neste tipo de sondas compara-se a variação de impedância entre duas bobinas, estando uma delas colocada num padrão, ou junto à primeira mas com enrolamento em sentido oposto (Figura 2.6). Em vez de se ler o valor absoluto de impedância, neste caso lê-se o valor da diferença, é esta diferença que fornece a indicação de um possível defeito. Com a existência de duas bobinas, a emissão-recepção é feita pela geração de correntes induzidas por uma das bobinas e a recepção pela outra, que irá detectar as alterações na circulação das CI.

---

<sup>1</sup> O processo da galvanoplastia ou galvanização, consiste na transferência de iões a partir de um metal imerso em um substrato para outra superfície (metálica ou não), através da electrólise.

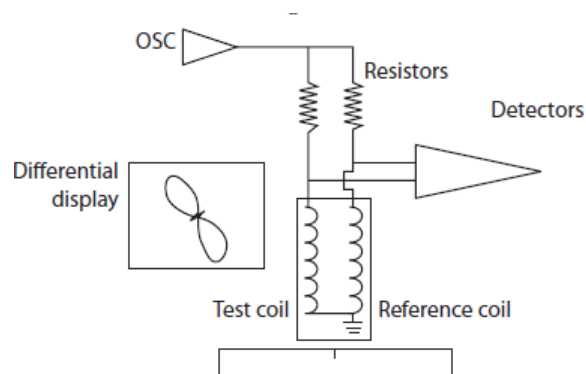


Figura 2.6 - Funcionamento da sonda em modo diferencial [3]

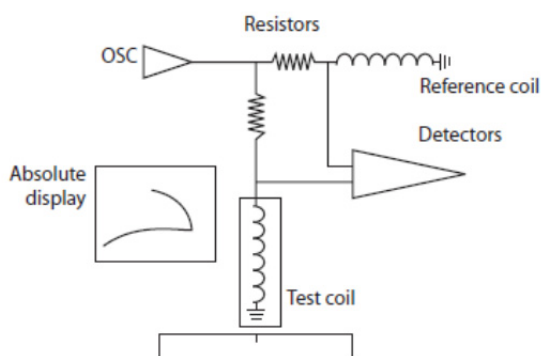


Figura 2.7 - Funcionamento da sonda em modo absoluta [3].

#### 2.4.2 - Micro-bobinas matriciais (Array)

A ECA (*eddy currents array*) é uma tecnologia de ensaios não destrutivos que fornece a capacidade de conduzir electronicamente várias bobinas, que são colocadas lado a lado, tornando-as numa só sonda (Figura 2.8). A aquisição de dados é realizada por multiplexação<sup>2</sup>, evitando-se assim a indutância mútua entre as bobinas individuais. Esta tecnologia traz algumas vantagens comparativamente às convencionais entre as quais se destacam:

- i) Uma maior área de inspeção, com este método é possível inspeccionar uma área maior numa só passagem mantendo uma elevada resolução;

<sup>2</sup> A multiplexação consiste na operação de transmitir várias comunicações diferentes ao mesmo tempo através de um único canal físico.

- ii) Uma menor necessidade de robótica, pois com uma única passagem por parte do operador é possível obter resultados na formação de um gráfico C-Scan, com os dados de *output* é possível trabalhá-los e ter uma percepção melhor dos tipos de defeitos. Por fim o aspecto mais relevante é o facto de a sonda poder adquirir geometrias complexas [10], [11].

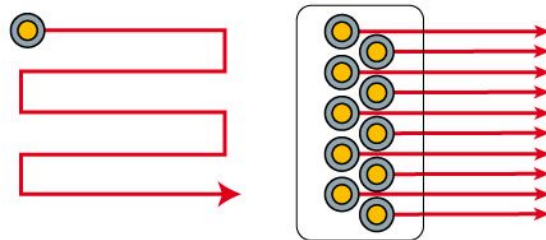


Figura 2.8 - Método de análise convencional em comparação com a análise em matriz (à direita) [10].

### 2.4.3 - Correntes Induzidas Pulsadas

As correntes induzidas pulsadas também conhecidas como *pulsed eddy currents* (PEC), têm sido utilizadas em ensaios não destrutivos com forte evidência na indústria de energia nuclear. Os maiores avanços nesta técnica de inspeção não destrutiva ocorreram recentemente, por parte dos físicos (Krzwosz et al, 1985; Sather, 1981; Waidelich, 1981; Wittig e Thomas 1981). A técnica PEC tem inúmeras vantagens em relação às correntes induzidas convencionais, nomeadamente, maior profundidade de penetração, maior informação acerca de defeitos e grande robustez contra interferências. Em contraste com as sondas de correntes induzidas convencionais, as PEC necessitam de menores consumos de energia, o que torna o desenvolvimento de novas sondas uma ideia muito promissora em contraste com as convencionais, pois utiliza correntes pulsadas de excitação.

Em comparação com o método convencional de inspeção por correntes induzidas, as correntes pulsadas têm a vantagem de serem excitadas por uma onda quadrada, que permite obter com um único passo mais informação uma vez que utiliza uma excitação com multi-frequências o que leva a uma penetração cerca de 10% maior que a conseguida através dos métodos convencionais [9].

#### 2.4.3.1 - Limitações do método

Uma das limitações deste método prende-se com a direcção dos defeitos encontrados nas peças. Apesar de os defeitos encontrados perpendicularmente à corrente induzida serem

facilmente detectáveis, os paralelos e os de grande comprimento são de difícil detecção. Para colmatar esta falha na detecção de defeitos em cordões de soldadura, foi desenvolvido um método que consiste numa sonda com uma corrente induzida uniforme composta por duas ondas sinusoidais de excitação que geram um campo magnético rotativo, no entanto uma vez que esta não teve a capacidade de detectar defeitos em toda as direcções não se aprofundou o seu estudo neste trabalho.

#### **2.4.3.2 - Tipos de sondas de CI Pulsadas**

##### *2.4.3.2.1 - Cup-Core*

Este tipo de sonda gera sempre correntes induzidas perpendiculares aos defeitos, quando estes passam pelo centro da sonda. A sonda *Cup-Core* é mostrada na Figura 2.9 onde se evidencia uma bobina de emissão central que se encontra compreendida entre dois núcleos de ferrite. Tanto a bobina de emissão como a de recepção estão contidas entre os dois núcleos de ferrite. A bobina de emissão induz uma corrente coaxial circular sobre a sonda, e quando esta cruza uma falha no material, é emitida uma corrente perpendicular que distorce o campo magnético, a bobina receptora recebe o campo magnético alterado indicando a presença de um defeito no material. O núcleo de ferrite não só garante a simetria entre as bobinas como um menor ruído e a redução da fuga do campo magnético o que leva a um aumento da sensibilidade na detecção de defeitos.

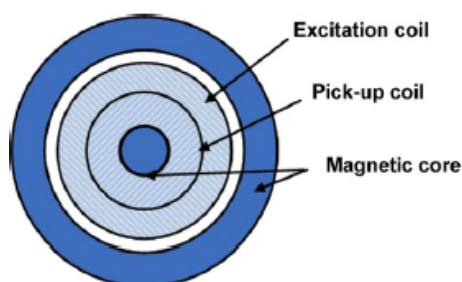


Figura 2.9 - Secção da sonda Cup-core [9].

##### *2.4.3.2.2 - Cross-coil Probe*

As sondas com este tipo de configuração podem ser compostas por uma bobina de excitação que é perpendicular à bobina *pick-up* criando um campo magnético paralelo, por isso, se nenhuma falha perturbar o campo criado pelas correntes induzidas, não haverá tensões à

saída. Com base na dedução, a sonda bobinas cruzadas, tem a particularidade de se auto anular (Figura 2.10 (a)). Uma sonda com as bobinas em cruz consiste numa bobina de excitação e numa bobina de captação perpendiculares entre si, fazendo ambas um ângulo recto com a superfície a inspeccionar.

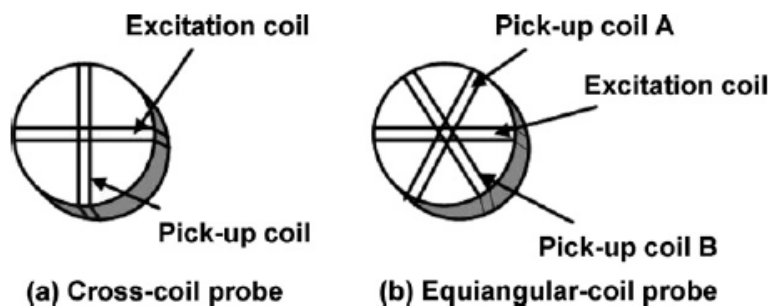


Figura 2.10 - Sondas com as bobinas perpendiculares à superfície de teste: (a) sonda com bobina em cruz; (b) sonda com bobina equiângula [9].

Como esquematizado na Figura 2.11, com um defeito comprido o ângulo criado entre o defeito e a bobina de excitação assume a letra “a”.

Observa-se que a corrente induzida é paralela à bobina de excitação, e que é a tensão induzida que está perpendicular ao defeito que contribui para a detecção do mesmo, ou seja, os defeitos só são detectáveis se a tensão lhes for perpendicular. Para contornar esta desvantagem da sonda, na Figura 2.10 b) está esquematizada uma sonda que contém três bobinas separadas entre si por 60 graus, permitindo assim obter melhores resultados.

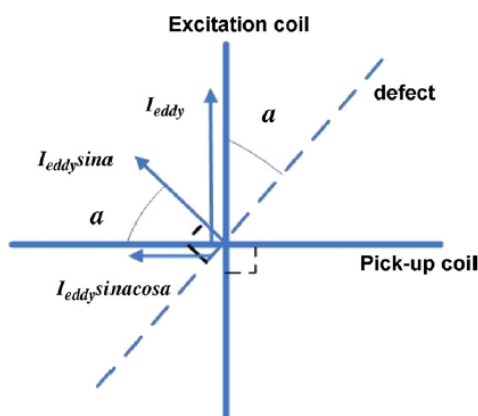


Figura 2.11 - - Princípios físicos da sonda com bobina em cruz [9].

A dedução das correntes induzidas nas bobinas *pick-up* (a) e (b) assume a lei dos senos.

$$I_1 = 2I_{\text{eddy}}\text{sen}(a) \cdot \text{sen}(30^\circ + a) \quad (2.2)$$

$$I_2 = 2I_{\text{eddy}}\text{sen}(a) \cdot \text{sen}(30^\circ - a) \quad (2.3)$$

#### 2.4.3.2.3 - Sonda de Bobinas Cruzadas otimizada

Esta sonda encontra-se representada na Figura 2.12 podendo observar-se que comporta duas sondas de excitação A e B e uma bobina *pick-up*. Para contornar o problema de detecção de defeitos perpendiculares e paralelos ao mesmo tempo criou-se esta sonda que permite conciliar os dois pulsos de corrente em sobreposição, mostrando como resposta diferentes intervalos de tempo no mesmo período.

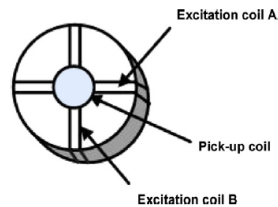


Figura 2.12 - Sonda Bobinas cruzadas Otimizada [9].

#### 2.4.4 - Giant Magnetoresistance (GMR)

O efeito magneto resistivo foi descoberto por William Thomson, mais conhecido por Lord Kelvin (26 Junho 1824 – 17 Dezembro 1907) em 1856, embora não tenha conseguido diminuir o valor da resistência eléctrica de nenhum material mais do que 5%, esse efeito foi posteriormente chamado Ordinary Magnetoresistance (OMR). Mais recentemente investigadores descobriram materiais que apresentam Giant Magnetoresistance (GMR), Colossal Magnetoresistance (CMR) e Magnetic Tunnel Effect (TMR). [13]

Em 1988 o fenómeno GMR foi descoberto por uma equipa de investigação liderada por Peter Grünberg (18 Maio 1939), e em simultâneo foi descoberto de forma independente, mas em multi-camadas Fe/Cr pelo grupo de Albert Fert (7 Março 1938) da universidade de Paris-Sud (França). [13]

A Giant Magnetoresistance (GMR), é a mudança na resistência eléctrica de alguns materiais em resposta a um campo magnético aplicado. Foi descoberto que a aplicação de um campo magnético constituído por multi-camadas magnéticas metálicas, tais como Fe/Cr e

Co/Cu, em que as camadas ferro-magnéticas separadas por camadas de espaçamento não magnéticos de uma espessura muito reduzida, isto resulta numa redução significativa da resistência eléctrica das multi-camadas. Este efeito foi desenvolvido para ser muito maior do que outros efeitos magneto resistentes que nunca tinham sido observada em metais, daí ser chamado de “Giant Magnetoresistance”, pois a sua magnitude pode ser superior a 100% em baixas temperaturas (Figura 2.13) [14], [15].

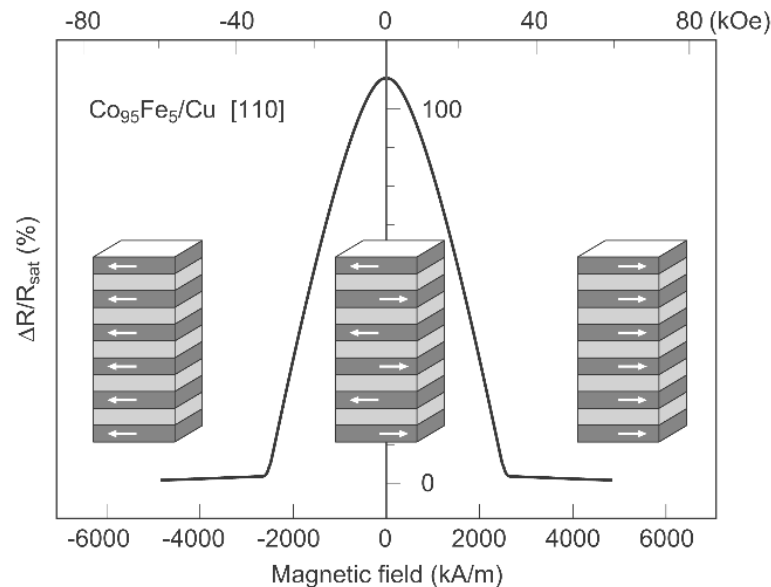


Figura 2.13 - Curva de *sputtered epitaxial* [110] orientada AF acoplado Co/Cu em multi-camadas para o campo aplicado ao longo da direcção [110] no plano da puper rede. As inserções mostram, esquematicamente, o alinhamento das direcções de magnetização nas camadas de CO. [15]

A mudança na resistência das multi-camadas surge quando o campo aplicado alinha os momentos magnéticos das camadas sucessivas ferro magnéticas, como é ilustrado esquematicamente na Figura 2.13. Na ausência do campo magnético de magnetização das camadas ferro magnéticas são anti-paralelas. A aplicação do campo magnético, que alinha os momentos magnéticos e satura a magnetização da multi-camada, leva a uma queda na resistência eléctrica da multi-camada.

Desde a descoberta da GMR, gerou-se um grande interesse entre os laboratórios académicos e industriais, devido à física que controla este fenómeno, e a um tremendo potencial tecnológico. Em 2007 Albert Fert e Peter Grünberg receberam o prémio Nobel da Física pela descoberta da GMR [14]

#### 2.4.4.1 - Aplicação na detecção de defeitos nos cordões de soldadura

Estudos levados a cabo recentemente [20] indicam que os sensores magneto-resistentes têm vindo a tomar maior evidência relativamente aos ensaios com bobinas de correntes induzidas convencionais. Como já se viu anteriormente existem várias vertentes nos sensores magneto resistentes, mas o que oferece melhores resultados ao nível da detecção de defeitos em juntas soldadas é o GMR, pois é o método que apresenta melhor solução.

Após alguma pesquisa descobriu-se um sensor que combina dois GMR'S com uma bobina de excitação. Esta configuração de sensor apresenta uma boa sensibilidade na detecção de defeitos subsuperficiais, mesmo quando as frequências de excitação são baixas. Com este sensor o *lift-off* também é reduzido, permitindo uma melhor detecção de defeitos.

O sensor apresentado na Figura 2.14 é constituído por uma bobina de excitação rectangular e por um magnetómetro de alta sensibilidade baseado no sensor GMR, sendo este último utilizado para a detecção dos defeitos por meio dos campos magnéticos secundários criados pelas correntes induzidas.

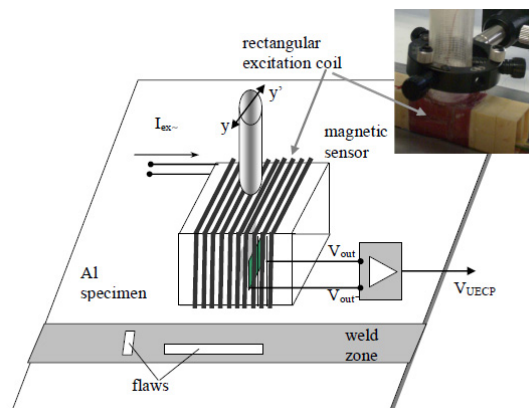


Figura 2.14 - Sonda uniforme de correntes induzidas com GMR sobre uma placa de alumínio com defeitos no cordão de soldadura [20].

Como apresentado anteriormente, a sonda é constituída por duas partes principais, a bobina de excitação (a) e o sensor magnético (b).

A bobina de excitação para detecção de falhas na zona de soldadura tem que ser de sensibilidade máxima e a posição das bobinas deve ser escolhida de forma a assegurar que as correntes induzidas se mantêm perpendiculares à superfície, porém, para aplicações práticas este tipo de restrição é difícil de satisfazer, o que resulta numa menor sensibilidade. Para se aplicarem correntes induzidas uniformes utilizam-se bobinas rectangulares compridas.

O sensor magnético, localizado ao longo do eixo longitudinal da bobina usa a arquitectura de uma GMR, com o objectivo de detectar pequenas mudanças no campo magnético, este tipo de sensor não depende da frequência utilizada. É de notar que este sensor de GMR está configurado em uma ponte de Wheatstone, permitindo assim excitar dois



dos elementos ficando os restantes dois como referência. Obtêm-se desta configuração uma maior precisão.

#### 2.4.5 - MWM® (Meandering Winding Magnetometer)

Conceito patenteado a 11 de Agosto de 1998 por N. Goldfine [11], este tipo de sondas baseiam-se num enrolamento primário de excitação e em dois enrolamentos secundários de recepção imediatamente adjacentes aos primeiros dispostos em planos paralelos ou coincidentes. O traçado dos filamentos da sonda pode apresentar diferentes configurações como se mostra na Figura 2.15.

O princípio de funcionamento destas sondas baseia-se na proximidade entre o enrolamento primário de excitação e os enrolamentos secundários de recepção, os quais estão praticamente adjacentes. Desta forma, os campos magnéticos de elevada intensidade existentes na vizinhança do enrolamento primário de excitação são incluídos na área definida pelos enrolamentos secundários de recepção, o que contribui para o aumento de sensibilidade da sonda.

Estas sondas são fixas ao provete, isto é, durante o teste de resistência, a sonda encontra-se permanentemente acoplada e a obter resultados, este facto é uma mais-valia relativamente às sondas convencionais de correntes induzidas por se encontrarem acopladas ao provete de teste tornando-se assim possível a detecção de pequenas fissuras que podem chegar aos 250  $\mu\text{m}$ .

Nos ensaios de tracção as sondas MWM® são acopladas aos provetes (Figura 2.16), com o objectivo de dimensionar e detectar as pequenas fissuras que vão aparecendo no provete. Mais uma vez é uma inspecção on-line, que nos permite ver os tipos de defeitos encontrados nos provetes durante os ensaios.

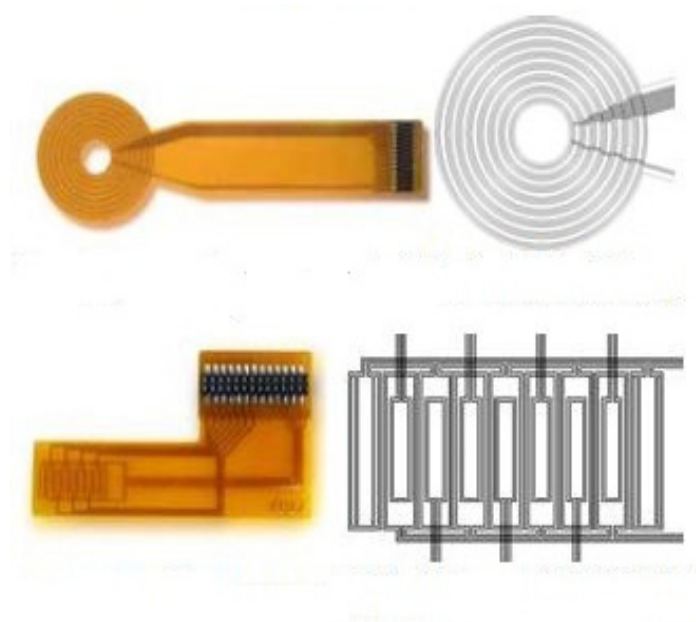


Figura 2.15 - Duas configurações possíveis para as sondas de MWM [18].

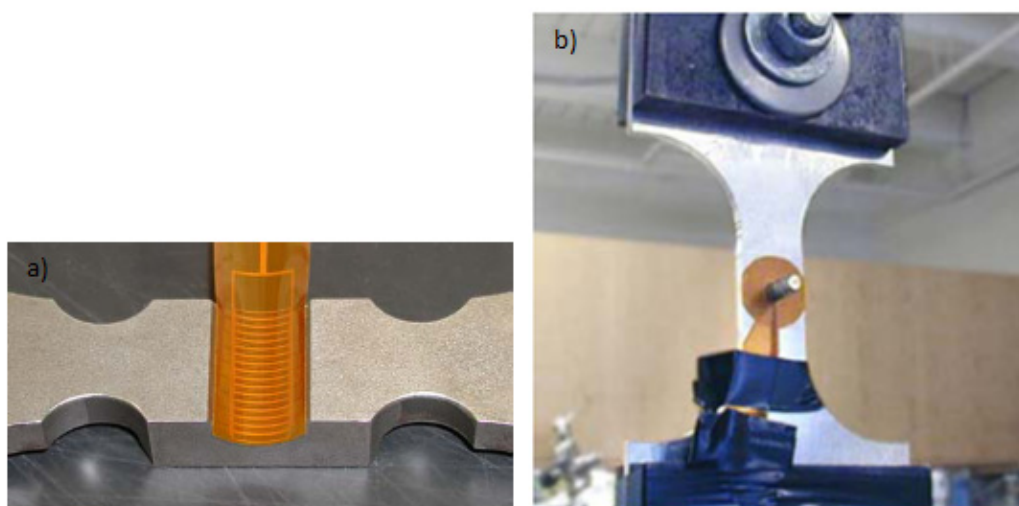


Figura 2.16 - (a) Sonda com sete canais de array, (b) sonda permanente em forma de roseta [18].

Foi estudada a aplicabilidade das sondas MWM-*Array* em cordões de soldadura por fricção linear (SFL), com o objectivo de se detectar defeitos que são denominados por defeitos na raiz (Tipo I), que são uma imperfeição que resulta do facto de o *nugget* não abranger toda a espessura da chapa com se mostra na Figura 2.17 (a), defeitos longitudinais (Tipo II) mais ou menos contínuos, que se caracterizam pela existência de vazios de material na forma de um canal (resultado do carácter estacionário do processo de SFL), com uma secção transversal representada na Figura 2.17(b). O método baseia-se na medição da condutividade eléctrica das juntas soldadas, a qual permite mapear essa propriedade e identificar a existência de defeitos.

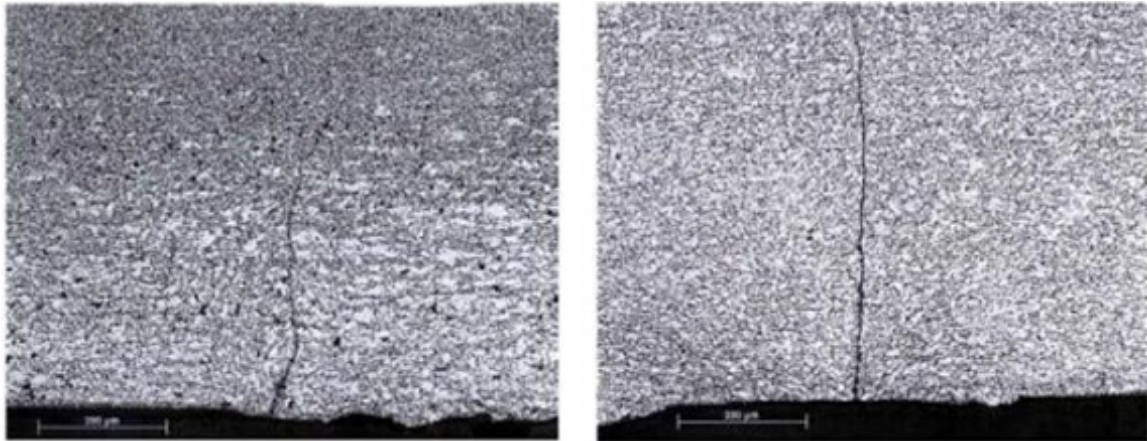


Figura 2.17 - (a) Defeito na raiz do cordão de soldadura; (b) Defeito longitudinal.

Este estudo [18] foi realizado com uma sonda MWM-Array com 37 sensores dispostos paralelamente entre si, e uma unidade de enrolamento rectangular (Figura 2.18). Os defeitos encontrados resultaram do comprimento insuficiente do pino da ferramenta de SFL. O objectivo do ensaio permitiu identificar defeitos do tipo I e II do lado da raiz do cordão. Realizou-se um varrimento matricial com a sonda MWM-Array, a qual foi excitada com diferentes frequências: 398 KHz, 2 MHz e 10 MHz. Com estas frequências produziram-se mapeamentos de condutividade eléctrica e de *lift-off*.

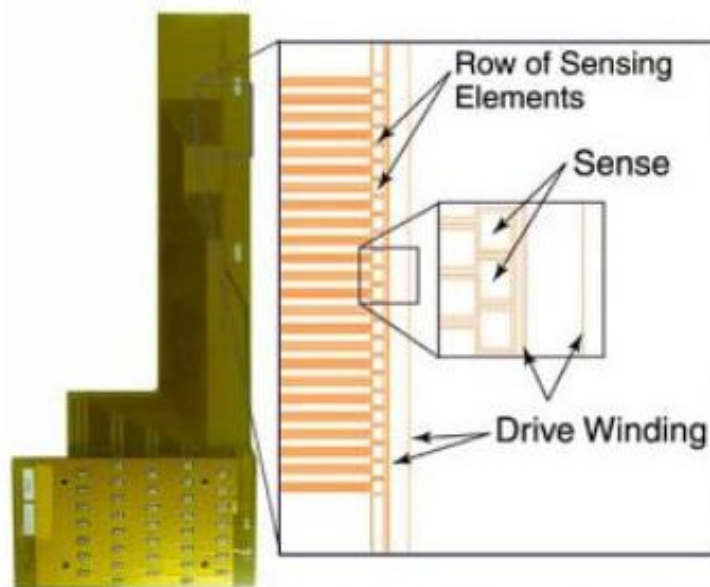


Figura 2.18 - Sonda MWM-Array com 37 sensores paralelos.

O esquema apresentado na Figura 2.19 mostra como se realizou a inspecção da raiz do cordão de SFL. O sensor realizou um varrimento longitudinal e transversal à superfície em estudo, sendo a sonda colocada do lado da raiz do cordão. Todo o *Software* foi desenvolvido

pela GridStation® e permite obter imagens idênticas às das Figura 2.20, Figura 2.21 e Figura 2.22.

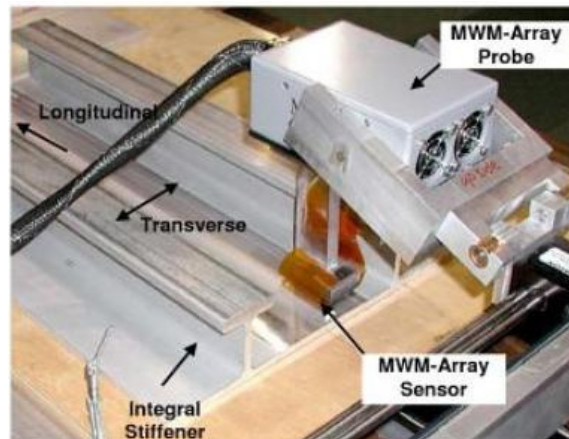


Figura 2.19 - Esquema de inspeção com a sonda MWM-Array

Na Figura 2.20 observa-se o resultado obtido pelo varrimento longitudinal num cordão de SFL, ou seja, o mapeamento de condutividade da zona em inspeção. A imagem revela também uma ampliação do cordão na **sua** zona central, dando uma ênfase maior à zona de baixa condutividade (zona a vermelho) e as zonas de alta condutividade estão representadas a verde e azul, as escalas de ambos os eixos X e Y estão em milímetros.

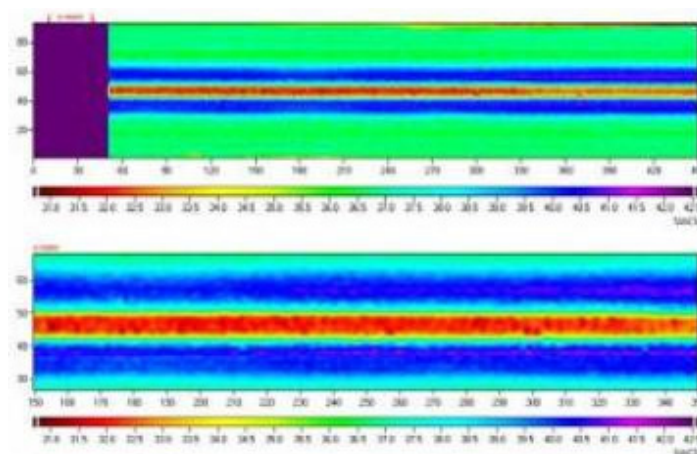


Figura 2.20 - Varrimento longitudinal do cordão de SFL.

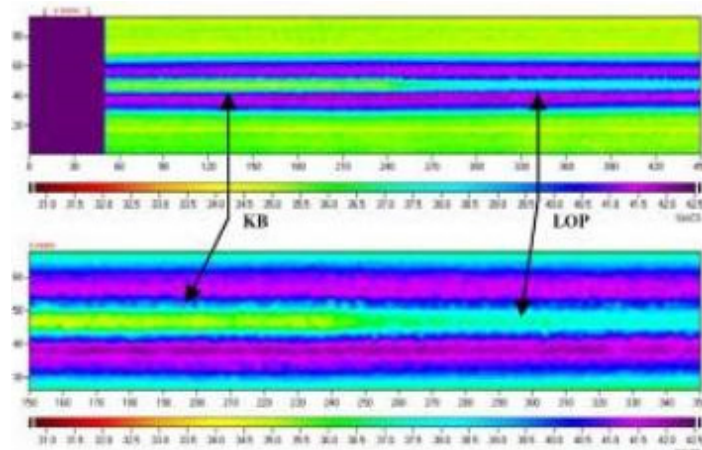


Figura 2.21 - Varrimento longitudinal do cordão de SFL, com identificação de defeitos do Tipo I e II.

Na Figura 2.21 estão representados os dois tipos de defeitos, Tipo I (lado esquerdo) e Tipo II (lado direito). Pode-se observar que em contraste com Figura 2.20, a zona de baixa condutividade torna-se fisicamente mais estreita na região do defeito, isto verifica-se pois a condutividade torna-se mais baixa quando existe falta de material, é ainda mais evidente quando se observa a região que contém o defeito do Tipo II. Uma vez mais na parte inferior da Figura 2.21 realizou-se uma ampliação da zona central do cordão de SFL.

Na Figura 2.22 observa-se uma descontinuidade planar do tipo intermitente. A imagem inferior contém uma visão expandida do cordão de SFL na sua região central, utilizando uma gama de cores redimensionada para dar maior destaque a zona de baixa condutividade (com o objectivo de mostrar que é estreita), e a redução da condutividade devido à presença da descontinuidade.

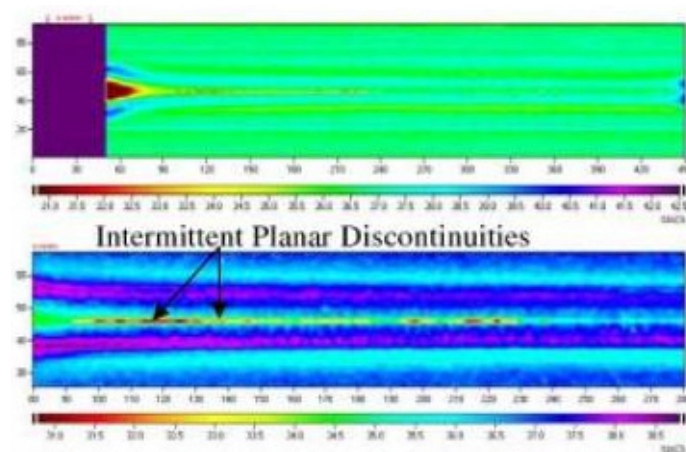


Figura 2.22 - Varrimento longitudinal do cordão de SFL, com descontinuidades intermitentes planar.

#### 2.4.6 - SQUID

As primeiras actividades de END a usar SQUID datam de 1982 realizadas por H. Weinstock, M. Nisenoff e por G.B. Donaldson da universidade de Strathclyde.

Os investigadores Weinstock e Nisenoff analisaram anomalias em furos e cordões de soldadura em condutas de aço, assim como o sinal magnético de barras sujeitas a ensaios de tracção. Num estudo idêntico, Donaldson realizou pesquisas na detecção de falhas em chapas ferro magnéticas. O primeiro ensaio de correntes induzidas com a técnica SQUID foi realizado por Capobianco do National Bureau of Standards. Mas o primeiro grupo a utilizar a possibilidade de parametrizar o tipo de falha e a sua geometria, foi Wikswo da Universidade de Vanderbilt [12].

Neste método aplica-se High Temperature Superconductor (HTS) ao sensor de SQUID que opera à temperatura do Azoto líquido (77K). O método foi desenvolvido para a detecção de defeitos superficiais.

SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) é um sensor de fluxo magnético com uma resolução muito elevada baseado no efeito Josephson<sup>3</sup> para supercondutores. Combinado com o fluxo das antenas obtém-se uma melhor resolução. O sensor SQUID tem que ser cuidadosamente arrefecido, para reduzir a influência da “área do campo de fundo” no resultado. São possíveis de obter resoluções de cerca de 6,1 m num ambiente controlado isolado magneticamente. Para se realizar a inspecção de um cordão de soldadura o sensor SQUID tem que ser móvel, a fim de se obter um campo de fundo tipicamente de 100 pT<sup>4</sup> o que afectar a homogeneidade. Para se contornar este problema, utilizam-se antenas de fluxo distinto, desta forma o gradiente do campo é cerca de 1pT/cm.Hz (passível de ser obtido sem se recorrer a um ambiente laboratorial).

A grande vantagem do sensor SQUID prende-se com o facto de este poder trabalhar numa ampla faixa de frequências que vão desde DC até ao décimo de megahertz, assim, consegue-se uma alta relação sinal/ruído. Quando se pensa em SQUID, três aplicações diferentes são possíveis, DC-Susceptometry, Baixa frequência, Alta frequência, o que as distingue são as diferentes frequências de inspecção.

Realizou-se um sistema de correntes induzidas por SQUID, do tipo alta frequência, numa sala com a temperatura controlada, utilizando uma sonda de correntes induzidas ligada a

---

<sup>3</sup> Efeito Josephson é um efeito físico que se manifesta pelo aparecimento de uma corrente eléctrica que flui através de dois supercondutores fracamente interligados, separados apenas por uma barreira isolante muito fina.

<sup>4</sup> Picotesla =  $10 \times 10^{-13}$  Tesla



um sensor SQUID à temperatura do Azoto líquido (Figura 2.23), e a Figura 2.26 mostra um diagrama esquemático da parte electrónica deste sistema [12], [21].

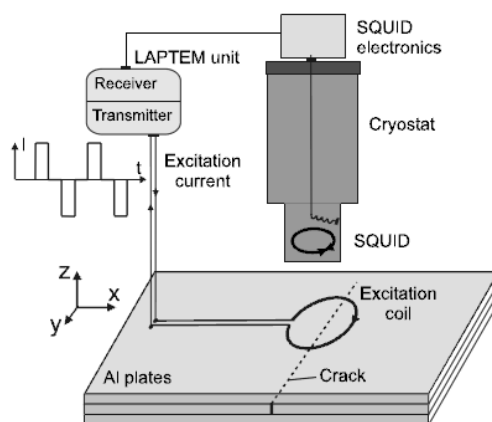


Figura 2.23 - Sistema de correntes induzidas por SQUID [12].

#### 2.4.6.1 - Criogenia:

Utilizaram-se vários tipos de reservatórios de criopreservação, neste exemplo concreto tem-se um de aço inoxidável com aproximadamente 1 litro de capacidade, que permite alcançar os 77 K com o nitrogénio líquido. Este arrefecimento permite fazer estudos até cerca de 12 horas.

#### 2.4.6.2 - Sensor SQUID:

O conversor SQUID e a bobina de acoplamento são dispositivos elaborados em filme fino supercondutor de alta temperatura  $YBa_2Cu_3O_7$  em substratos  $SrTiO_3$ , este substrato tem a forma de um quadrado de 10 x 10 mm (Figura 2.24), para melhorar o acoplamento. O conversor SQUID é um dispositivo que tem uma camada de grão cristalino em um substrato cristalino que permite preparar as junções para se realizar o efeito de Josephson.

Na Figura 2.25 estão esquematizados diferentes tipos de geometrias de sondas de correntes induzidas com SQUID. Todos os regimes, com a excepção do da Figura 2.25(e), são diferenciais. Como se pode observar, todas as outras sondas são compostas por duas bobinas de excitação absoluta, dispostas de tal modo que os seus campos magnéticos permitem anular-se. A comparação entre o sinal das duas áreas das bobinas permite perceber que o afastamento entre eles mostra uma maior sensibilidade para a detecção de pequenas falhas. Da Figura 2.25(a) a (c) mostra-se a configuração de bobina dupla em “D” de correntes alternadas, que contém em paralelo um gradiómetro (planar à superfície da amostra). Tem-se também o esquema de

detecção-excitação no qual a excitação e leitura são orientadas ortogonalmente entre si como se mostra na Figura 2.25(f).

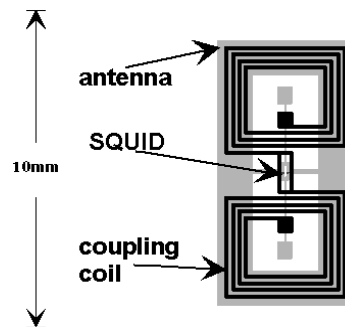


Figura 2.24 - Layout do sensor SQUID [21].

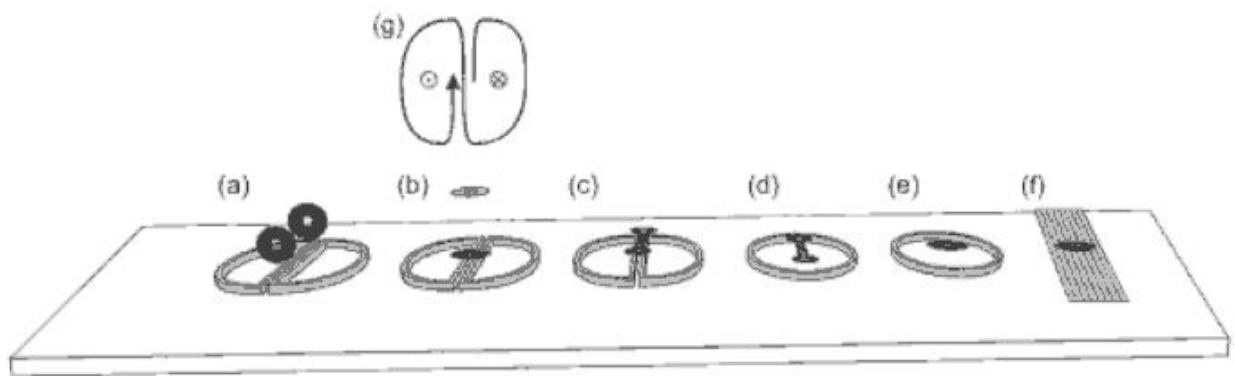


Figura 2.25 - Esquema que mostra diferentes maneiras de excitação das bobinas com SQUID [21].

#### 2.4.6.3 - *Electrónica SQUID:*

A tensão de saída do conversor SQUID é, não linear e periódica, com um período de fluxo de  $2 \cdot 10^{-15}$  Vs. A fim de se linearizar o sinal de saída do SQUID, o circuito e o fluxo são fechados. O sensor funciona como um detector nulo, e para manter o SQUID com um bom ponto de ajuste, utilizou-se uma frequência de 6 MHz.



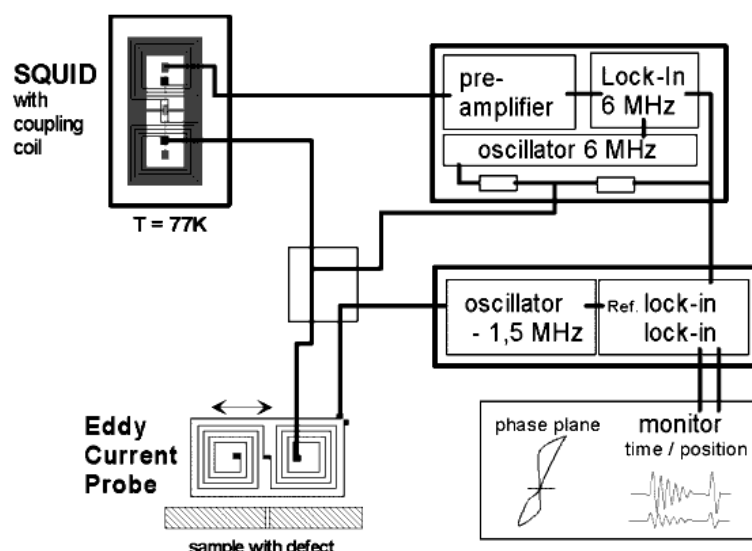


Figura 2.26 - Diagrama esquemático da parte electrónica [21].

## 2.4.7 - Sonda de CI “IONic Probe”

### 2.4.7.1 - Princípios de funcionamento

Sonda IONic<sup>5</sup> é um novo conceito de sondas por correntes induzidas para aplicação em Ensaios Não Destrutivos que foi patenteada a 19 de Outubro de 2007, por Telmo Santos e Pedro Vilaça [3] [17], tendo sido desenvolvida e patenteada em 2008 uma variante deste conceito de sonda [16].

A criação desta sonda teve como principal objectivo aumentar a capacidade detecção de defeitos com dimensões ou morfologias de difícil detecção mediante uma: i) atenuação do efeito de *lift-off*, ii) aumento da sensibilidade através da proximidade com a superfície do material a inspeccionar, iii) correntes induzidas a circular por todas as direcções do material a inspeccionar.

Esta sonda inovadora tem como principais componentes um filamento de excitação e duas bobinas sensíveis. Olhando para as componentes da sonda, observa-se que é constituída por 5 elementos (Figura 2.27) para os quais se adoptou a seguinte nomenclatura: bobina de excitação toroidal (1); bobina sensível espiral plana (2); suporte das bobinas (3); suporte da bobina de excitação (4); terminais das bobinas sensíveis (5).

<sup>5</sup> Nome adoptado, pois a sua geometria faz lembrar a forma geométrica dos adornos característicos dos capitéis das colunas da ordem jónica (IONic em inglês) que surgiu na antiga Grécia oriental por volta do século 450 a. C. Estes adornos caracterizavam-se por uma forma simétrica em espiras, tipo voluta.

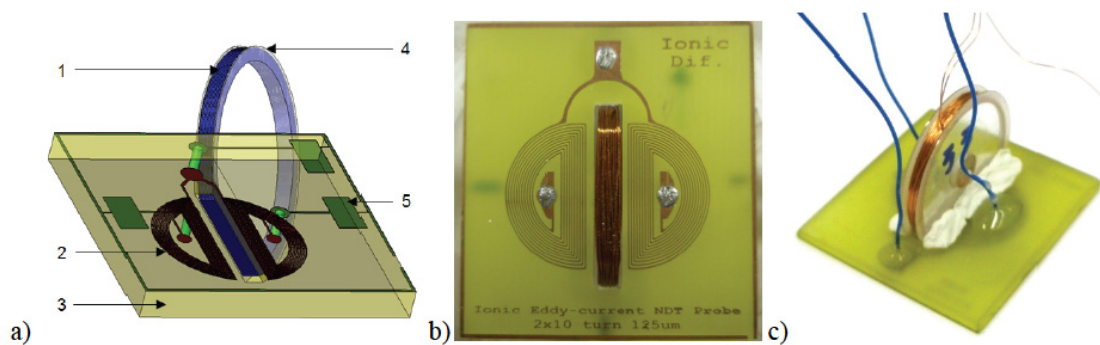


Figura 2.27 - Sonda IONIC [3]

- a) Modelação 3D de desenho de conjunto dos vários componentes da sonda, b) Vista de topo do primeiro protótipo construído (30x30 mm e excitação de 55 espiras), c) Vista de cima do segundo protótipo construído (15x15 mm e excitação de 33 espiras).  
(1-bobina de excitação, 2-bobina sensível espiral plana, 3-substrato, 4-suporte, 5-terminal de ligação).

O filamento de excitação toroidal da bobina (1), pode ser excitado com uma corrente eléctrica alternada, com uma forma de onda tipicamente sinusoidal, podendo também ser utilizadas ondas triangulares ou quadradas. As frequências de funcionamento utilizadas são idênticas às frequências utilizadas nas sondas de CI convencionais, ou seja, entre os 5 kHz a os 2 MHz.

A ideia fundamental desta concepção consiste em criar uma independência entre o sinal da sonda e os campos das correntes induzidas num material perfeitamente homogéneo (livre de qualquer defeito). Com isto obtém-se um sinal constante aos terminais da sonda, independentemente da condutividade global do material homogéneo, e da posição da sonda relativamente a esse material (*lift-off*), quer a sonda esteja em contacto com o material quer se encontre no ar. A nível eléctrico isto corresponde a eliminar o efeito de indução da bobina sensível, pois este efeito de indução depende do campo das correntes induzidas, que por sua vez depende da condutividade eléctrica e da permeabilidade magnética dos meios condutores na sua vizinhança, bem como da frequência do fluxo de campo magnético que atravessa as suas espiras. Se por um lado queremos a independência entre o sinal da sonda e o campo das correntes induzidas, por outro lado queremos que seja sensível à presença de heterogeneidades de material, que se traduz numa perturbação do campo das correntes induzidas. Este é o aspecto crucial da sonda IONIC, ou seja, esta só deve ser sensível aos campos de correntes induzidas que resultem de heterogeneidades, mas não deve ser sensível aos campos de correntes induzidas de materiais homogéneos.

Consegue-se este comportamento mediante o traçado da bobina sensível (2), pela sua posição relativa ao filamento de excitação toroidal (1) (Figura 2.27) e ao material a ser

inspeccionado. A bobina sensível espiral plana é simétrica relativamente ao seu eixo central, tem a forma de um D, ou seja, uma semicircunferência, com enrolamentos em sentidos opostos, esta particularidade gera um efeito de compensação da força eletromotriz nas bobinas. Pode-se então concluir que a corrente induzida pelo filamento de excitação na semicircunferência da direita, por exemplo, tem a mesma intensidade e o sentido oposto da corrente induzida na semicircunferência esquerda, resultando um equilíbrio de correntes que gera uma diferença de potencial nula aos terminais das bobinas sensíveis ( $U_{out} = 0$ ). Este equilíbrio é verificável quando se introduz correntes induzidas num material homogéneo. Deste modo a diferença de potencial aos terminais das bobinas é sempre nulo, quer a sonda esteja no ar, quer esta esteja a uma outra qualquer distância paralela do material a inspeccionar, tornando-a insensível ao efeito de *lift-off*. Esta insensibilidade ao efeito de *lift-off*, parte logo pelo facto da sonda ser planar, o que não permite uma espécie de *lift-off* angular.

As discontinuidades nos materiais a inspeccionar são de fácil detecção, pois se uma das bobinas sensíveis se encontrar em cima da discontinuidade, a diferença de potencial aos seus terminais deixa de ser zero. Um aspecto importante desta sonda é que ao contrário das sondas convencionais de CI, a detecção dos defeitos não é feita com base na variação da impedância eléctrica, mas sim com base na variação da tensão eléctrica induzida ( $U_{out}$ ) aos terminais das bobinas sensíveis, tendo como referencia a corrente eléctrica de excitação do filamento central.

Para melhor se perceber o funcionamento da sonda IONic do ponto de vista dos campos magnéticos e das correntes eléctricas envolvidas em três situações distintas, têm-se esquematizado na Figura 2.28 essas mesmas situações, citação retirada de [3].

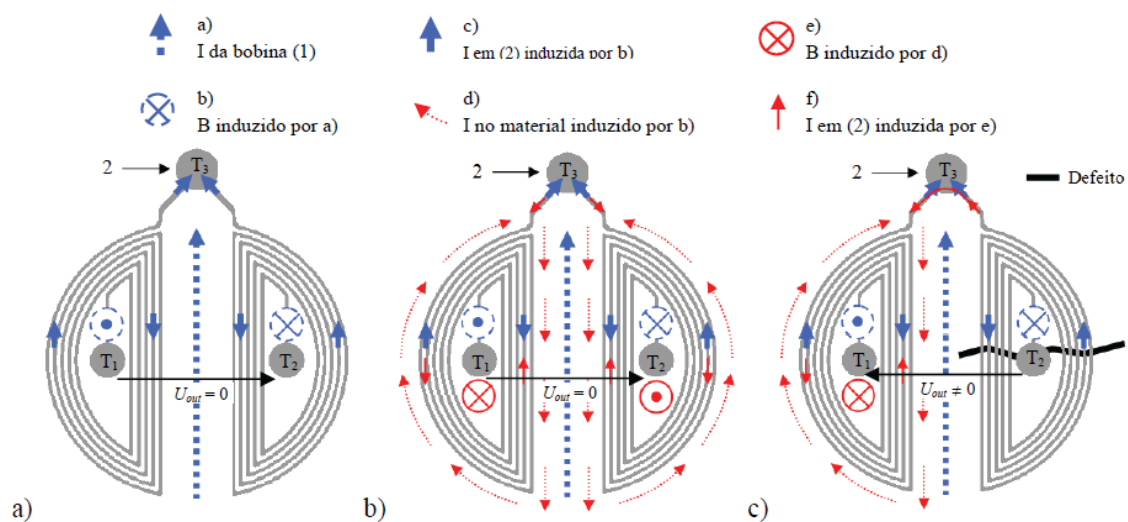


Figura 2.28 - Princípio de funcionamento da sonda IONic: Correntes eléctricas e campos magnéticos envolvidos a) Sonda no ar, b) Sonda sobre material homogéneo, c) Sonda sobre defeitos.

i) Primeira situação de funcionamento: sonda no ar ou *lift-off* infinito (Figura 2.28 a): a bobina de excitação toroidal (1) ao ser percorrida por uma corrente eléctrica sinusoidal a) induz um campo magnético b), de acordo com a lei de Biot-Savart [22], que por sua vez induz uma corrente c) na bobina sensível espiral plana (2), de acordo com a lei geral da indução. O traçado especial da bobina sensível espiral plana (2), com duas semicircunferências espirais de sentidos opostos, faz com que o fluxo do campo magnético b) tenha duas contribuições opostas para a corrente global induzida nesta espiral. Assim, a corrente induzida na metade esquerda é anulada pela corrente induzida na metade direita, o que resulta numa corrente global nula e consequentemente um  $U_{out}$  também nulo aos terminais T1 e T2 da bobina sensível espiral plana (2). Estas três grandezas eléctricas (corrente a), campo magnético b) e corrente c)), características da primeira situação de funcionamento, mantêm-se presentes e inalteradas nas outras duas situações de funcionamento.

ii) Segunda situação de funcionamento: sonda no material livre de defeitos (Figura 2.28 b): quando a sonda se aproxima de um material homogéneo livre de defeitos, para além das três grandezas eléctricas da primeira situação (Figura 2.28 a), aparece também no material homogéneo um campo de corrente eléctrica d), com a forma aproximada de duas semicircunferências, que é induzida pelo campo magnético b) de acordo com a lei geral da indução. Esta corrente eléctrica d) induz um campo magnético e), que por sua vez induz uma corrente f) na bobina sensível espiral plana (2). Se o material for homogéneo, com condutividade ( $\sigma$ ) constante em X e Y, então todas as correntes eléctricas a), c), d) e f) e campos magnéticos b) e e) irão mantêm-se simétricos relativamente ao plano de simetria da bobina sensível espiral plana (2). Nestas condições, a corrente global induzida na bobina sensível espiral plana (2) será nula, assim como a tensão eléctrica induzida  $U_{out}$  aos terminais T1 e T2, pelas mesmas razões descritas na primeira situação de funcionamento. Este equilíbrio de correntes mantêm-se independentemente da distância da sonda ao material a inspeccionar (*lift-off*).

iii) Terceira situação de funcionamento: sonda no material com defeitos (Figura 2.28 c): relativamente à situação anterior, a existência de um defeito sob uma das semicircunferências cria uma perturbação à circulação da corrente induzida d) e consequentemente uma diminuição do campo magnético e), que por sua vez provoca uma diminuição da corrente induzida f) na bobina sensível espiral plana (2). Esta situação introduz um desequilíbrio da corrente induzida f), que se traduz pelo aparecimento de  $U_{out}$  diferente de zero aos terminais T1 e T2 da bobina sensível espiral plana (2). É com base nesta tensão eléctrica induzida  $U_{out}$  diferente de zero que se avalia a existência de defeitos.

A tensão eléctrica induzida  $U_{out}$  que aparece nos terminais da bobina sensível espiral plana (2) caracteriza-se por uma diferença de fase ( $\phi$ ) e por uma diferença de amplitude ( $A$ ) relativamente à corrente eléctrica que circula na bobina de excitação toroidal (1). A avaliação dos defeitos é feita com base na variação das componentes real e imaginária do vector impedância eléctrica aparente (Equação 2.4). Ou seja, trata-se de uma impedância aparente de “transferência” definida como sendo o quociente entre a tensão induzida na bobina sensível espiral plana ( $U_{out}$ ), e a corrente eléctrica de excitação que circula na bobina de excitação toroidal ( $\vec{I}$ ). O enrolamento secundário é a bobina sensível espiral plana. Ou seja trata-se de um sistema com dois portos, ou então três portos em vez de dois, considerando a medição da tensão induzida aos terminais T1-T3 e T2-T3 separadamente, em vez de se medir directamente aos terminais T1-T2.

$$\text{Real} = \text{Re} \left\{ \frac{\vec{U}_{out}}{\vec{I}} \right\} [\Omega] \quad \text{Imaginária} = \text{Im} \left\{ \frac{\vec{U}_{out}}{\vec{I}} \right\} [\Omega] \quad (2.4)$$

Outros aspectos relevantes de funcionamento que transcorrem da concepção da sonda IONIC estão descritos em baixo [3]:

i) Carácter tridimensional de circulação das CI no material a inspeccionar (Figura 2.30). As sondas axissimétricas como referido anteriormente só induzem correntes no material de forma circular e em planos paralelos ao plano de inspecção. Já na sonda IONIC a indução é realizada pelo filamento de excitação toroidal (1), este facto provoca um campo vectorial tridimensional de CI no material a ser inspeccionado. Ou seja, as CI circulam em todos os planos com rotação segundo o eixo definido pelo filamento de excitação toroidal (1), incluindo o plano perpendicular a superfície de inspecção (Figura 2.30). Isto leva a uma melhor detecção de defeitos independentemente da sua morfologia. A Figura 2.29(a) mostra como se comportam as CI das sondas convencionais, quando inspecciona um defeito paralelo à superfície de inspecção, o campo das CI neste tipo de sondas sofre uma fraca perturbação, pois as correntes podem circular acima e abaixo do defeito, sem nunca o interceptarem, o que faz com que não ofereça resistência significativa à circulação das correntes.

A sonda IONIC irá ser afectada pela existência de um defeito paralelo a superfície de inspecção, pois tem o campo de CI a circular nas 3 direcções (Figura 2.29 c), o qual induz correntes que atravessam esse defeito. Em suma, as sondas convencionais são menos sensíveis a defeitos com esta morfologia que a sonda IONIC. Por sua vez na Figura 2.29 b) percebemos o

comportamento das linhas de CI, das sondas axissimétricas e observa-se que são perpendiculares ao defeito, sendo a resistência à sua passagem determinada pela espessura e condutividade desse defeito, se estes defeitos forem da ordem do  $\mu\text{m}$  a sonda não os detecta. Olhando para o comportamento da sonda IOnic, para o mesmo tipo de defeitos, apesar da sua reduzida espessura, oferece uma resistência à circulação das CI superior, já que existem linhas de corrente que deveriam circular longitudinalmente ao longo do próprio defeito. Assim se existir um defeito na ordem do  $\mu\text{m}$  essa perturbação à circulação das CI tem efeito nas linhas de corrente com trajectória perpendicular ao defeito, e tem efeito também nas linhas de corrente que deveriam circular longitudinalmente em planos muito próximos ao plano do próprio defeito. Assim sendo a sonda IOnic provoca uma espécie de ampliação do defeito.

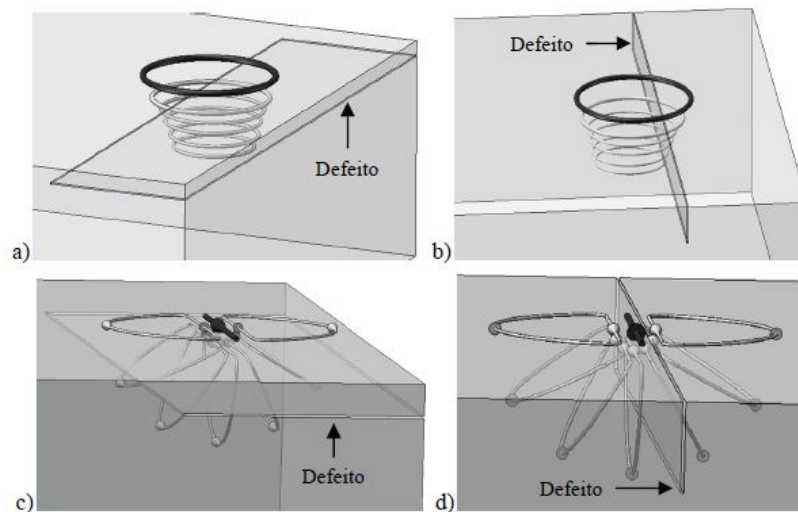


Figura 2.29 - Circulação das CI nas imediações de defeitos paralelos e perpendiculares à superfície  
a) CI da sonda axissimétrica junto do defeito paralelo, b) CI da sonda axissimétrica junto do defeito perpendicular  
c) CI da sonda IOnic junto do defeito paralelo, d) CI da sonda IOnic junto do defeito perpendicular.

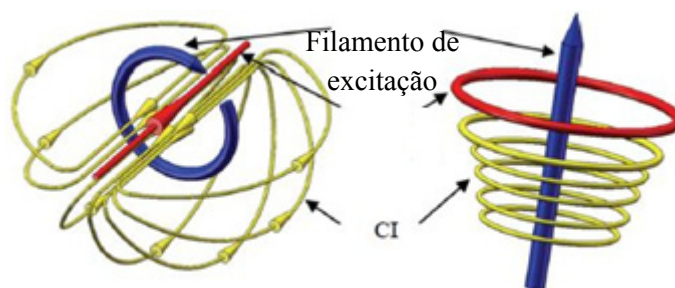


Figura 2.30 - Representação esquemática das correntes e campos nas sondas IOnic e convencionais.

ii) Paralelismo entre as bobinas sensíveis (2) e a sua proximidade ao material a inspeccionar. Estes dois factos oferecem uma maior sensibilidade a sonda na detecção de defeitos com morfologias variadas e reduzidas dimensões. O facto de a sonda funcionar em modo diferencial e não em modo absoluto também contribui para o aumentar a sua sensibilidade, já que o valor de tensão induzida  $U_{out}$  é menos afectado por interferências externas que se podem manifestar desde a ligação da sonda à placa de aquisição de dados.

Este é um dos aspectos mais positivos desta sonda, e que só é possível pois a avaliação dos defeitos é feita com base numa perturbação qualitativa do sinal da sonda e não com base num valor absoluto, estando este altamente dependente de muitas outras variáveis para além da variação de condutividade dos materiais.

iii) Direcção rectilínea das correntes induzidas pelo filamento de excitação toroidal (1) no material, este facto pode ser usado como vantagem nas inspecções em que existe um conhecimento a priori das orientações preferenciais desses defeitos.

iv) Inspeção de peças com defeitos perto do seu bordo, torna-se possível de inspeccionar, pois as bobinas sensíveis (2) são perpendiculares aos bordos do material. Este facto torna-se possível pois a tensão eléctrica  $U_{out}$  não é alterada pela ausência parcial de material, sendo somente alterada por um desequilíbrio de condutividade em uma das metades das bobinas sensíveis (2), devido à presença de um defeito.

v) Possibilidade de a sonda poder operar segundo um método de inspeção baseado na análise da variação da tensão eléctrica induzida aos terminais das bobinas sensíveis (2)  $U_{out}$  durante um movimento de rotação de  $360^0$  da sonda sobre si mesma, em cada ponto a inspeccionar (Figura 2.31). Este procedimento permite aumentar a informação relativa a cada ponto do material inspeccionado, uma vez que em cada passagem fornece não apenas um valor único do sinal, mas um conjunto de valores associados a cada posição angular da sonda.

A informação associada a cada posição angular da sonda, pode ter uma utilidade directa ou indirectamente relacionada com a localização dos defeitos, sobretudo a possibilidade de conferir o estado do acoplamento da sonda ao material a inspeccionar, através da comparação do sinal fornecido pela sonda nos extremos do movimento de rotação ( $0^0$  e  $360^0$ ).

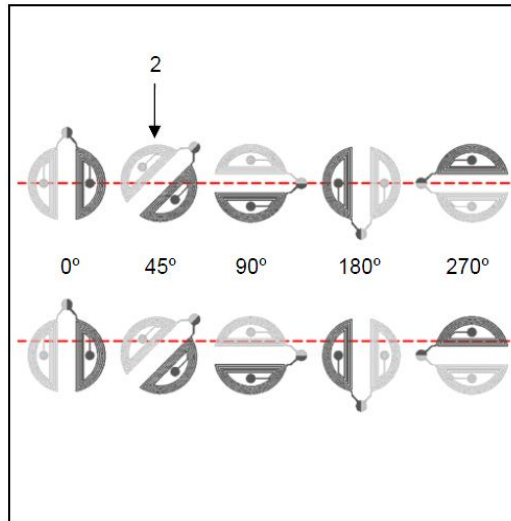


Figura 2.31 - Representação esquemática do método de inspecção baseado no movimento de rotação da sonda de 360°, com ou sem excentricidade relativamente à direcção dos defeitos;

2) Bobina sensível espiral plana [3].

## 2.5 - Síntese do Capítulo

No presente capítulo apresentou-se uma pesquisa actualizada, relativamente as técnicas avançadas de END aplicadas à SFL. Esta área tecnológica não tem sido alvo de desenvolvimentos relevantes, como se pode constatar pelas datas dos artigos referidos, contudo com o aparecimento da sonda IOnic, esta área voltou a ser alvo de desenvolvimentos, quer ao nível dos meios de aquisição de dados, quer ao nível de avaliações de condutividade de novos materiais, e surgem artigos científicos bastante recentes e interessantes.

Percebeu-se o que de novo existe em Ensaio Não Destrutivos, e fez-se uma avaliação das técnicas para se perceber as que podem ser alvo de novos estudos e optimizações, das sete técnicas avaliadas as que apresentam uma potencialidade grande relativamente a avaliação de micro defeitos em SFL foi a MWM e a IOnic Probe.



## **3 - METODOLOGIA DE OPTIMIZAÇÃO**

### **3.1 - Introdução**

Optimizar consiste em seleccionar, de um conjunto de possíveis alternativas uma que seja óptima, de acordo com um determinado critério. O objectivo principal das diversas configurações de sonda criadas é perceber qual delas tem um melhor comportamento na detecção de um defeito, e quais os parâmetros da sonda IOnic original que têm uma maior relevância para a sua optimização. Assim numa primeira fase o objectivo foi identificar os parâmetros que se vai querer alterar, e coloca-los numa matriz que vai permitir perceber que parâmetros são alterados de configuração para configuração de sonda, nas doze sondas em estudo. A esta matriz deu-se o nome de matriz das sondas pois é nela que estão descritas as doze sondas e seus parâmetros, esta matriz servirá de guide line para projectar as doze sondas para a simulação numérica.

Com a criação da matriz das sondas surgiu a necessidade de criar uma outra matriz que permitisse perceber o efeito de cada parâmetro individualmente, a essa matriz deu-se

o nome de matriz das relações. A matriz das relações permite identificar quais as sondas cuja configuração só difere num parâmetro.

### 3.2 - Principais parâmetros operacionais

A otimização da sonda IONic passa por diferentes etapas:

- 1- Compreensão do princípio de funcionamento
- 2- Alteração de parâmetros
- 3- Elaboração matricial
- 4- Relação de parâmetros

Analisando a estrutura da sonda conclui-se que esta é constituída por duas partes: filamento de excitação e bobinas sensíveis, cada uma com diferentes parâmetros relevantes. Para o filamento de excitação os parâmetros relevantes são o comprimento, a espessura<sup>6</sup> e a posição, enquanto para as bobinas sensíveis estes se referem à largura, ao número de espiras e ao Ø<sup>7</sup>, como se mostra na Figura 3.1. Para otimizar a sonda é necessário provocar uma alteração nestes parâmetros. A tabela a seguir apresentada esquematiza essas alterações.

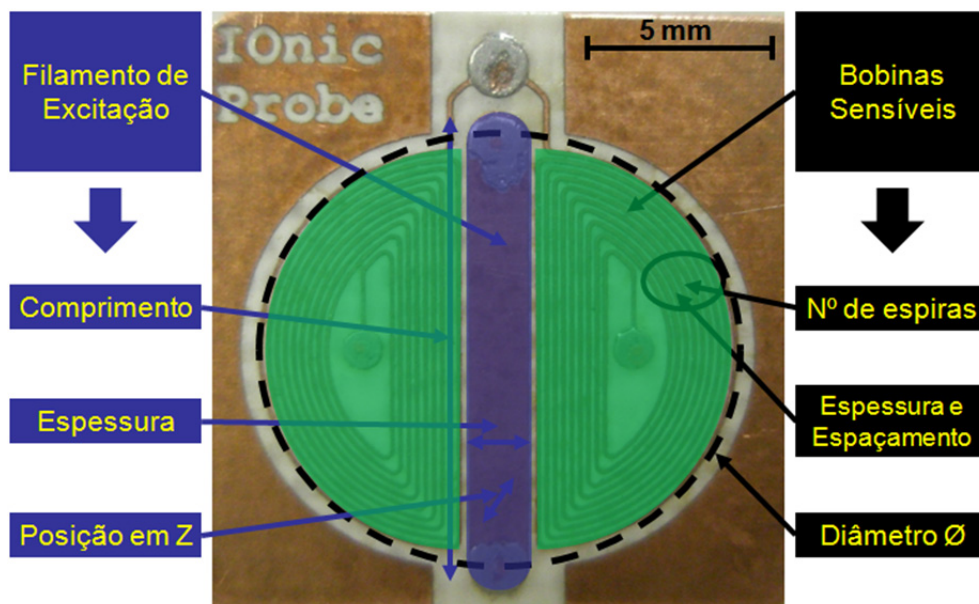


Figura 3.1 - IONic Probe com os principais parâmetros identificados.

<sup>6</sup> Sempre que se fala de espessura do filamento, este parâmetro refere-se a largura do filamento de excitação.

<sup>7</sup> Diâmetro exterior das bobinas sensíveis.

Tabela 3.1 - Apresentação das alterações a submeter aos parâmetros e respectiva representação na matriz.

Parâmetro		Alteração	Representação na matriz
Filamento de excitação	Comprimento (alteração a nível do Ø)	Manter	$\approx \text{ØSonda}$
		Reduzir para metade	$\approx \frac{1}{2}\text{ØSonda}$
		Aumentar para o dobro	$\approx 2\text{ØSonda}$
	Espessura	Aumentar para 2000 µm	2000 µm
		Manter os 1000 µm	1000 µm
		Diminuir para os 500 µm	500 µm
	Posição	No plano das bobinas	0 µm
		200 µm acima do plano das bobinas	200 µm
		Na superfície oposta à superfície das bobinas sensíveis	1400 µm
Bobinas Sensíveis	Largura	Manter os 100 µm	100 µm
		Diminuir para 50 µm	50 µm
	N espiras	Manter o maior número de espiras possível	Máximo
		Reduzir o número máximo de espiras para metade	Metade
	Ø	Manter os 10 mm	10
		Reduzir para 6 mm	6
		Aumentar para 14 mm	14

Como se pode observar pela Tabela 3.1, podem ser estudados um total de dezasseis parâmetros (três no comprimento, três na espessura, três na posição, dois na largura, dois no número de espiras e três no Ø), o que resulta em:  $3 \times 3 \times 3 \times 2 \times 2 \times 3 = 324$  combinações, isto é, 324 sondas diferentes (que podem ou não representar uma optimização da sonda original). Além de exaustivo, estudar todas as combinações é desnecessário, uma vez que, *a priori*, sabe-se que de grande parte das relações entre os diferentes parâmetros não resulta uma sonda com relativo ganho comparativamente à original. Este facto permite excluir grande parte das combinações, reduzindo-se o número de combinações com interesse efectivo para doze.

### 3.3 - Matriz das Sondas

Na Tabela 3.2 apresentam-se as relações entre os diferentes parâmetros das doze sondas, e na Tabela 3.3, mostra-se as doze sondas esquematizadas, para uma melhor percepção do que varia entre elas, estando descrito os atributos mais significativos de cada uma.

Tabela 3.2 - Matriz das sondas

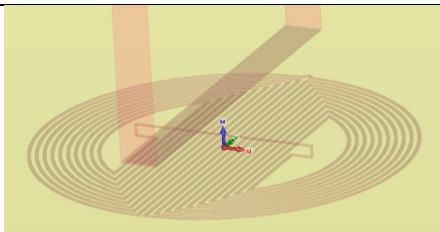
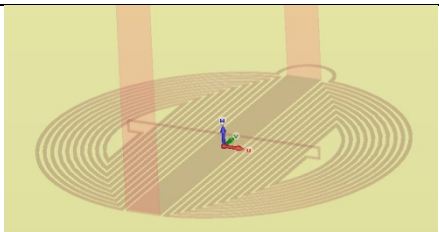
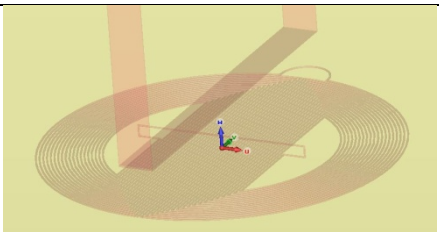
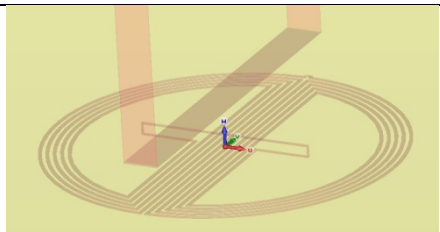
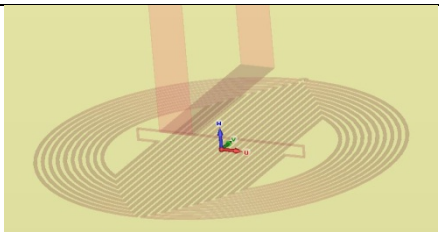
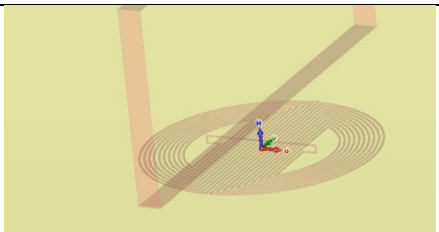
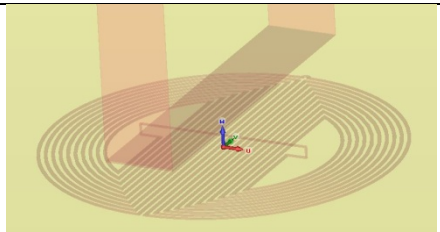
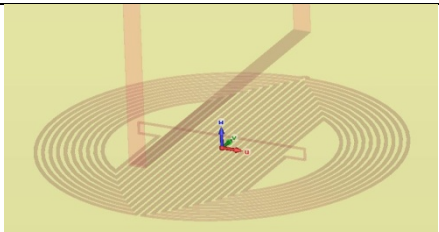
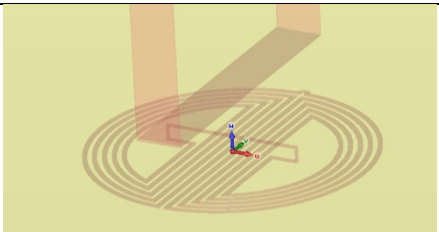
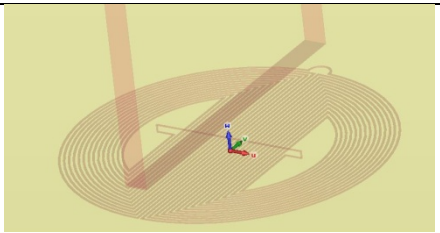
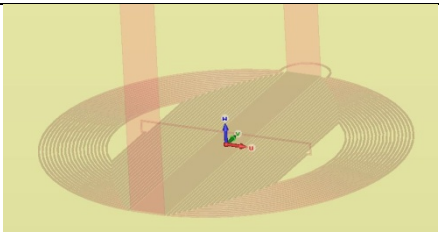
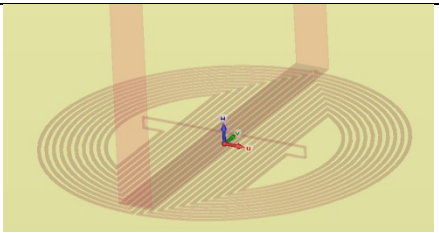
Sonda	Filamento de Excitação [F]									Bobinas Sensíveis [B]						
	Comprimento [E1]			Espessura (μm) [E2]			Posição (μm) [E3]			Espessura e Espaçamento (μm) [B1]		Nº espiras [B2]		Ø (mm) [B3]		
	$\approx \varnothing_{\text{Sonda}}$	$\approx \frac{1}{2}\varnothing_{\text{Sonda}}$	$\approx 2\varnothing_{\text{Sonda}}$	2000	1000	500	0	200	1400	100	50	Máximo	Metade	10	6	14
1	X				X				X	X		X		X		
2	X				X		X			X		X		X		
3	X				X				X		X	X		X		
4	X				X				X	X			X	X		
5		X			X				X	X		X		X		
6			X		X				X	X		X		X		
7	X			X					X	X		X		X		
8	X					X			X	X		X		X		
9	X				X				X	X		X			X	
10	X				X				X	X		X				X
11	X				X		X				X	X		X		
12	X				X			X		X		X		X		

Relativamente ao número de espiras é necessário fazer um esclarecimento: quando na matriz se diz que a sonda vai ser projectada com o número máximo de espiras significa que vai ter tantas espiras quantas as possíveis de serem incorporadas no diâmetro que se está a estudar, assim quanto maior o diâmetro da sonda que se está a estudar, mais espiras podem ser desenhadas. Quando se refere que o número de espiras é metade, significa que para esse mesmo diâmetro só se irá desenhar metade do número máximo de espiras possíveis de serem desenhadas.

Para melhor se perceber o número de espiras na sonda, a comparação entre a sonda # 1 e # 4 da Tabela 3.2 é um bom exemplo. Observando a sonda # 1 percebe-se que tem o número máximo de espiras para um diâmetro de 10 mm, isto significa que pode comportar 10 espiras nas bobinas sensíveis. Ao se observar a sonda # 4 percebe-se que está é idêntica, alterando apenas o parâmetro número de espiras para metade, logo irá apresentar 5 espiras nas bobinas sensíveis.

O número máximo de espiras para um diâmetro de 10 mm é 10 espiras por bobina sensível, isto para uma espessura e afastamento de 100 μm. Se esta espessura e afastamento passar para 50 μm, o número máximo para um mesmo diâmetro passa para o dobro.

Tabela 3.3 - Matriz que esquematiza as doze sondas e mostra os atributos principais de cada sonda.

Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
		
Filamento de excitação a 1400 $\mu\text{m}$ . Espessura e espaçamento das bobinas sensíveis de 100 $\mu\text{m}$ .	Filamento de excitação a 0 $\mu\text{m}$ . Espessura e espaçamento das bobinas sensíveis de 100 $\mu\text{m}$ .	Filamento de excitação a 1400 $\mu\text{m}$ . Espessura e espaçamento das bobinas sensíveis de 50 $\mu\text{m}$ .
Sonda 4	Sonda 5	Sonda 6
		
Filamento de excitação a 1400 $\mu\text{m}$ . Espessura e espaçamento das bobinas sensíveis de 100 $\mu\text{m}$ . 5 pistas nas bobinas sensíveis.	Filamento de excitação a 1400 $\mu\text{m}$ com 5 mm de comprimento. Espessura e espaçamento das bobinas sensíveis de 100 $\mu\text{m}$ .	Filamento de excitação a 1400 $\mu\text{m}$ com 20 mm de comprimento. Espessura e espaçamento das bobinas sensíveis de 100 $\mu\text{m}$ .
Sonda 7	Sonda 8	Sonda 9
		
Filamento de excitação a 1400 $\mu\text{m}$ com 2000 $\mu\text{m}$ de espessura. Espessura e espaçamento das bobinas sensíveis de 100 $\mu\text{m}$ .	Filamento de excitação a 1400 $\mu\text{m}$ com 500 $\mu\text{m}$ de espessura. Espessura e espaçamento das bobinas sensíveis de 100 $\mu\text{m}$ .	Filamento de excitação a 1400 $\mu\text{m}$ , com 6 mm de comprimento. Diâmetro exterior da sonda 6 mm.
Sonda 10	Sonda 11	Sonda 12
		
Filamento de excitação a 1400 $\mu\text{m}$ . Espessura e espaçamento das bobinas sensíveis de 50 $\mu\text{m}$ .	Filamento de excitação a 0 $\mu\text{m}$ . Espessura e espaçamento das bobinas sensíveis de 50 $\mu\text{m}$ .	Filamento de excitação a 200 $\mu\text{m}$ . Espessura e espaçamento das bobinas sensíveis de 100 $\mu\text{m}$ .

### 3.4 - Matriz das Relações

Para melhor se entender o que diferencia as doze sondas, criou-se uma matriz intitulada “Matriz das Relações” (Figura 3.2), esta matriz permite identificar quais as sondas cuja configuração só difere num parâmetro.

Por outras palavras, a matriz das Relações permite identificar quais os parâmetros geométricos que diferem entre quaisquer combinações de duas sondas.

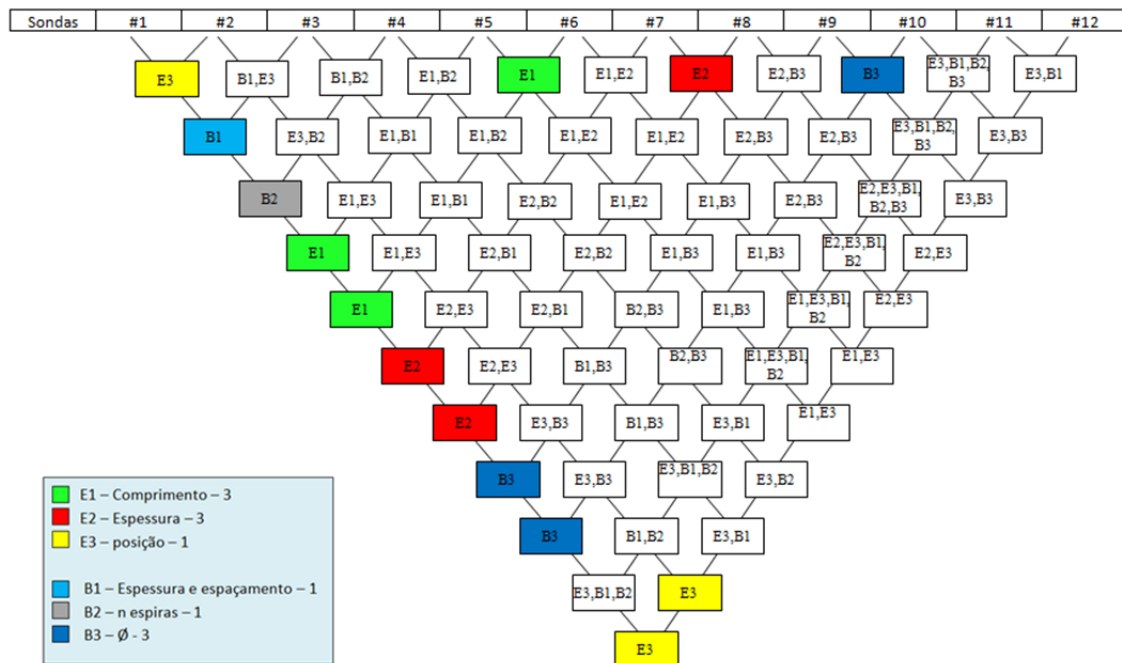


Figura 3.2 - Matriz das relações.

A matriz de relações, em que a primeira linha representa as sondas, é composta por entidades e relações, entendendo-se por entidades os rectângulos e por relações as linhas. As entidades podem representar uma ou mais alterações que são os parâmetros geométricos que varia (apresentadas por uma letra acoplada a um número) e contêm duas relações provenientes das sondas cujas alterações se pretendem estudar. Existem ao todo 66 entidades, correspondendo ao número máximo de combinações de doze sondas duas a duas ( $C_2^{12} = 66$ ).

O seguinte exemplo ilustra a interpretação da Matriz das Relações: na terceira entidade, lendo de cima para baixo e da esquerda para a direita, encontram-se as alterações B1 e B2 cujas relações provêm das sondas #3 e #4. Assim, o que diferencia estas duas sondas são duas alterações ao nível do parâmetro B1 (largura) e B2 (número de espiras), os restantes parâmetros são iguais para ambas as sondas.

A criação desta matriz proporciona uma leitura rápida das relações entre as sondas. Avalia-se, por exemplo o efeito do parâmetro E1 (comprimento do filamento de excitação) este parâmetro relaciona as sondas #1, #5, e #6, assim consegue-se perceber o efeito de E1 em três sondas distintas. Esta redundância permite concluir com mais exactidão os fenómenos provocados pelo parâmetro E1, uma vez que temos três sondas distintas, em que todos os outros parâmetros são iguais entre si à excepção do E1.

### 3.5 - Gráfico Ilustrativo do Conceito de Amplitude e *Spread*

Como nota introdutória à interpretação dos gráficos, importa estabelecer dois conceitos: amplitude e *spread*<sup>8</sup>.

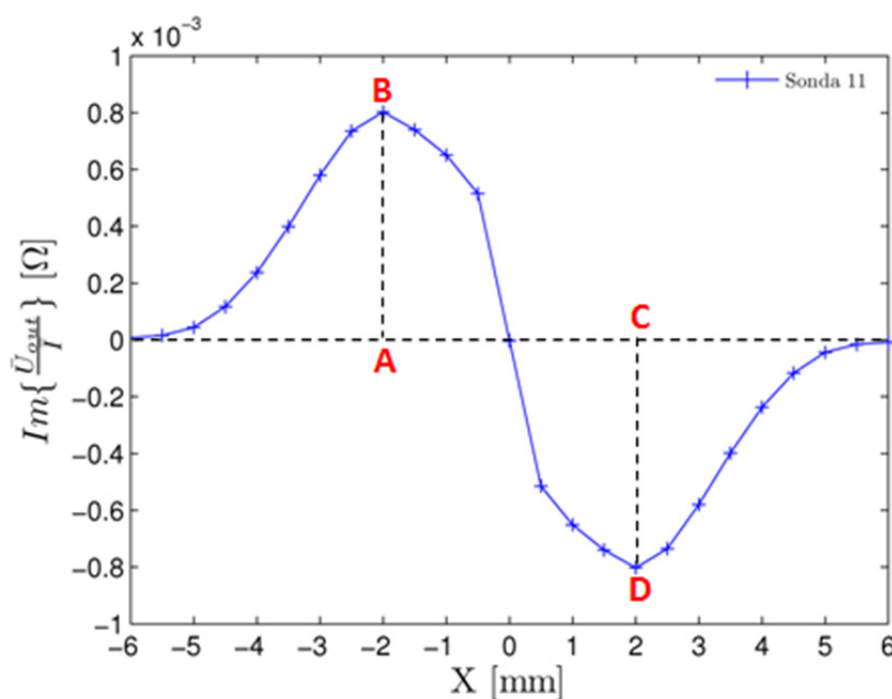


Figura 3.3 - Gráfico ilustrativo dos conceitos de amplitude e *spread*, os pontos A e C são a projecção dos pontos B e D no eixo das abcissas respectivamente.

A amplitude, esquematizada no gráfico pela distância entre o ponto A e B, ou seja, lida segundo o eixo das ordenadas, mede a magnitude de oscilação da onda produzida pelo sinal da sonda. O conceito de *spread* é aqui adoptado como uma medida lida segundo o eixo das abcissas. Esta medida é esquematizada no gráfico pela distância entre os pontos A e C, isto é, distância entre dois picos consecutivos (Figura 3.3).

<sup>8</sup> Apesar de ajustado para a presente interpretação, o conceito de *spread* não é um conceito matemático ou de medida.

A sonda que descreve um melhor comportamento é a que apresenta o maior quociente entre a amplitude e o *spread*. Este é o critério que permite fazer a distinção qualitativa entre as várias configurações de sonda.

### **3.6 - Síntese do capítulo**

Neste capítulo foram apresentadas duas matrizes que servem de base para realizar as simulações das doze sondas, apresenta-se também o estudo que permite perceber os parâmetros importantes da configuração da sonda IOnic, e os que foram alterados, para se obter uma melhor configuração.

A matriz das sondas esquematiza detalhadamente os parâmetros que foram alterados, e em que valores se realizaram essas alterações. Foram apresentadas as doze configurações de sonda em imagens, que permitem perceber melhor as alterações realizadas em cada uma das doze sondas.

Aplicaram-se os conceitos de *spread* e amplitude na leitura do sinal das sondas, e adoptou-se um critério de comparação entre as sondas definido pela razão entre estas duas grandezas.



## **4 - MODELAÇÃO NUMÉRICA**

### **4.1 - Introdução**

O objectivo da apresentação das modelações analíticas e numéricas descritas no presente capítulo prende-se com a necessidade de mostrar o comportamento dos fenómenos eléctricos e magnéticos envolvidos no funcionamento das sondas IOnic. Com base na matriz dos parâmetros descrita no capítulo 3 pretende-se perceber qual ou quais as melhores configurações da sonda IOnic.

O resultado de simulações realizadas com diferentes condições de inspecção é também apresentado neste capítulo.

Numa primeira fase de desenvolvimento da optimização da sonda IOnic pretendeu-se estudar o comportamento desta relativamente às correntes e ao modo como estas circulam no material a inspeccionar. Para tal recorreu-se a um estudo anteriormente realizado [3], que mostra o comportamento da intensidade e a disposição espacial do campo magnético

primário ( $H_p$ ) junto à zona da superfície de inspecção tornando-se assim possível a previsão da área de circulação das CI e a adaptação geométrica das bobinas sensíveis espirais planas para optimização da área atravessada pelo fluxo de campo magnético secundário ( $H_s$ ).

Na matriz das simulações descreveu-se os parâmetros e as condições de inspecção, a sua criação teve o objectivo de tornar as simulações mais simples e realizar ao mesmo tempo um estudo mais pormenorizado dos efeitos que estes trazem para o funcionamento da sonda. Com este estudo foram avaliadas as seguintes condições de inspecção:

- Frequência
- *Lift-off*
- Corrente
- Dimensões do material base
- Tamanho do defeito
- Espaçamento entre aquisições

Com este estudo pretende-se não só criar padrões de inspecção, que não serão alterados a quando do estudo dos doze protótipos, mas também estabelecer uma relação entre a capacidade da sonda na detecção de defeitos e a alteração dos seus parâmetros.

## 4.2 - Descrição do modelo de simulação

Na Figura 4.1 representa-se o modelo geométrico criado para a simulação dos campos magnéticos e dos campos vectoriais das CI das sondas IOnic. O modelo consiste num volume de material (inferior) com 11,6x11,6x5 mm com as propriedades eléctricas da liga AA2024-T351, e um volume (superior) com as mesmas dimensões, mas com as propriedades eléctricas do ar, os dois materiais apresentam propriedades eléctricas distintas, que podem ser lidas em Anexo A2, de notar que as propriedades do ar apresentam valores de zero, este facto deve-se ao *Software* assumir o bloco de ar como um bloco de vácuo. Os dois volumes tocam-se no plano  $Z = 0$ , e têm as faces centradas na origem do referencial. O filamento de excitação plano está contido no plano  $X = 0$ , e é percorrido por uma corrente eléctrica alternada de intensidade  $I$  e frequência  $f$  (Figura 4.1 b). O filamento central de excitação tem o segmento horizontal com um comprimento de 10 mm, uma altura de 35  $\mu\text{m}$  e uma espessura de 1000  $\mu\text{m}$ , no plano  $Z = 200 \mu\text{m}$ , os filamentos verticais têm o mesmo perfil do segmento horizontal e são ligados um ao outro por meio de um novo segmento horizontal que se encontra a uma altura de 10 mm. Foi usado um refinamento da malha com elementos hexaédricos criando uma malha mais refinada

na zona das bobinas sensíveis e do defeito (zonas mais críticas de análise, logo requerem mais elementos de análise), tendo resultado cerca de 600.000 elementos num quarto do volume de ar e material (Figura 4.2), isto é possível pois a sonda é simétrica no plano perpendicular ao filamento de excitação. O modelo mostrado na Figura 4.3 contém um defeito padrão com 300  $\mu\text{m}$  de espessura e 2 mm de profundidade, perpendicular ao filamento de excitação plano, este defeito foi criado realizando um corte no material base em todo o seu comprimento, e preenchendo-o com as propriedades do ar.

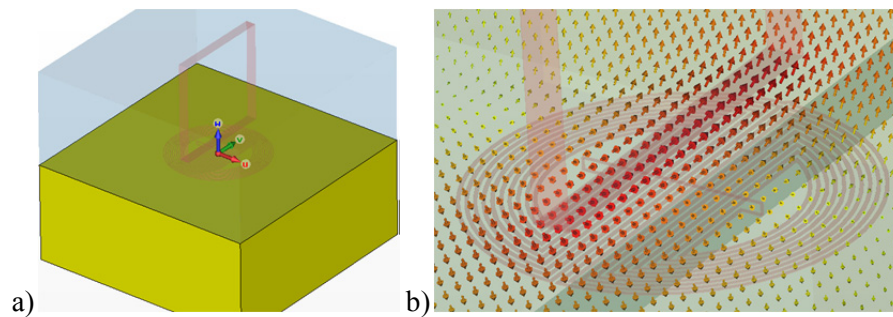


Figura 4.1 - Modelo geométrico utilizado para simulação dos fenómenos electromagnéticos das sondas IONIC.

a) Vista geral da base condutora, espaço em vazio e sonda IONIC.

b) Pormenor do filamento de excitação central, com as linhas de correntes representadas na cor vermelha.

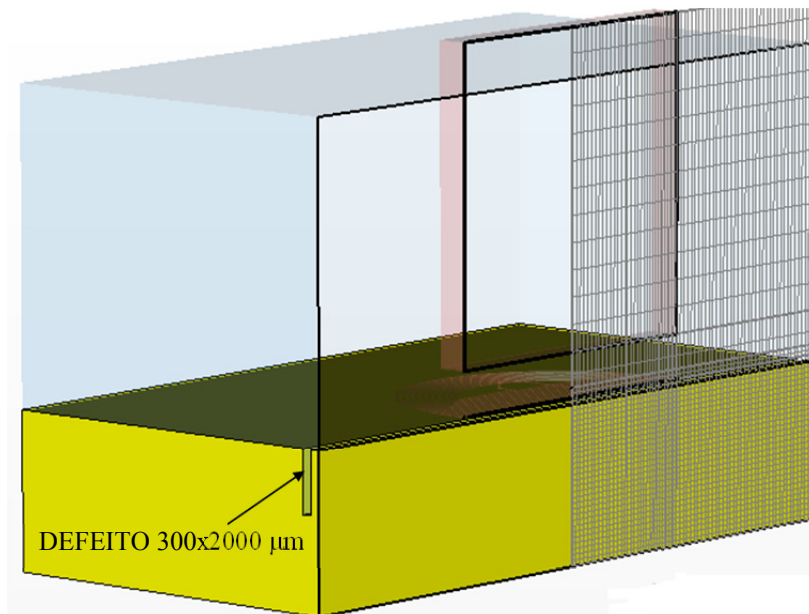


Figura 4.2 - Vista em corte da malha, num quarto do volume ar/material, e representação do defeito.

As bobinas sensíveis que se encontram representadas na Figura 4.1, formam um “D” de ambos os lados do filamento de excitação central, é considerada uma única bobina uma vez que

as duas metades estão ligadas entre si com enrolamentos em sentidos opostos. Estas são compostas por segmentos verticais e circunferenciais, sendo o de maior diâmetro igual ao filamento central, têm uma altura de 35  $\mu\text{m}$  e uma largura de 50  $\mu\text{m}$  ou 100  $\mu\text{m}$ , da maior para a menor os filamentos que constituem a bobina sensível estão afastados de 50  $\mu\text{m}$  ou 100  $\mu\text{m}$  entre si, este valor varia consoante a largura do filamento. As bobinas sensíveis são constituídas por 10 filamentos, que se encontram paralelos à superfície a inspeccionar.

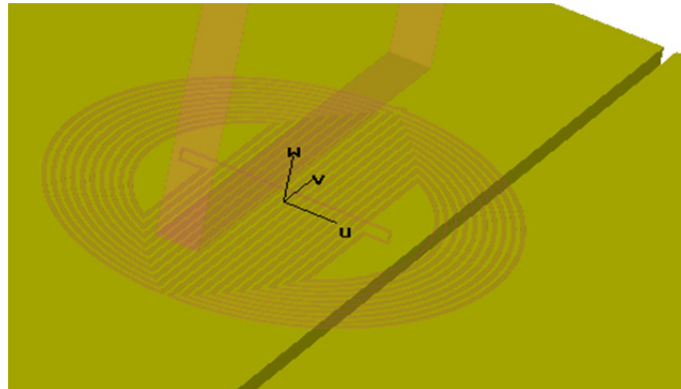


Figura 4.3 - Representação das bobinas sensíveis, filamento de excitação e do defeito visto de topo.

Na Figura 4.4 representa-se a intensidade do campo magnético produzido pelo filamento de excitação descrito em cima com  $I = 1\text{ A}$ . O esquema de cores da Figura 4.4 permite perceber que a intensidade do campo é simétrica pelo que os valores de indução magnética medidos na metade direita são iguais aos da metade esquerda mas com sinal contrário.

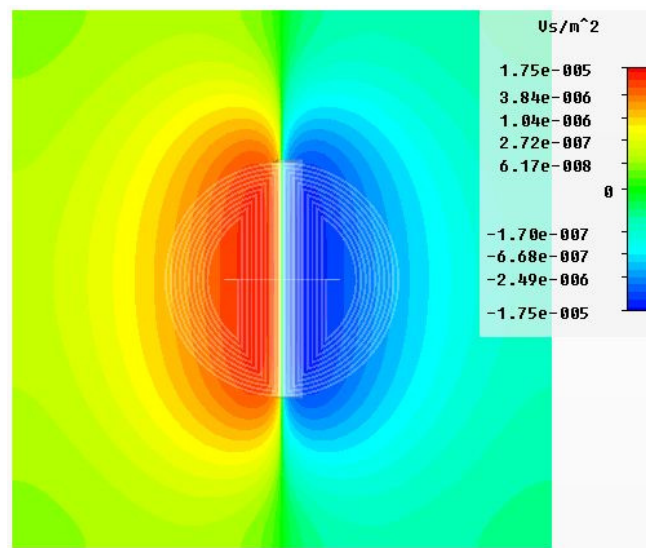


Figura 4.4 - Intensidade do campo magnético produzido pelo filamento de excitação com  $I = 1\text{ A}$ .

O campo vectorial é outro aspecto a ter em conta relativamente ao comportamento das sondas. A Figura 4.5 representa o campo vectorial das CI no plano  $Z = 0$  mm, ou seja à superfície do material a inspeccionar. A corrente eléctrica que atravessa o filamento de excitação é sinusoidal com frequência  $f = 100$  KHz e amplitude  $I = 1$  A. Para melhor se identificar a disposição das correntes com diferentes intensidades, representa-se a intensidade das CI em escala logarítmica de base 10 com e multiplicado por um factor de 1000. Uma análise mais detalhada da Figura 4.5 mostra que as correntes mais intensas se situam na superfície do material imediatamente abaixo do filamento de excitação, e que estas descrevem uma circulação simétrica em relação ao filamento de excitação, com trajectória do tipo semicircunferência. Na zona periférica das bobinas sensíveis, as correntes apresentam uma trajectória tipo vórtice e mostram uma fraca densidade. Note-se que as CI descrevem uma trajectória alinhada com o filamento de excitação e têm um sentido contrário ao sentido da corrente de excitação.

Na Figura 4.6 mostra-se o valor absoluto das CI no plano  $Z = 0$  mm provocadas pela sonda IOnic para uma frequência  $f = 100$  KHz. Esta representação permite perceber que existem CI com densidades consideráveis nas zonas para além das extremidades do filamento de excitação, facto este que se deve á tendência que as correntes têm em retomar o alinhamento da trajectória do filamento de excitação, onde a densidade de correntes é máxima.

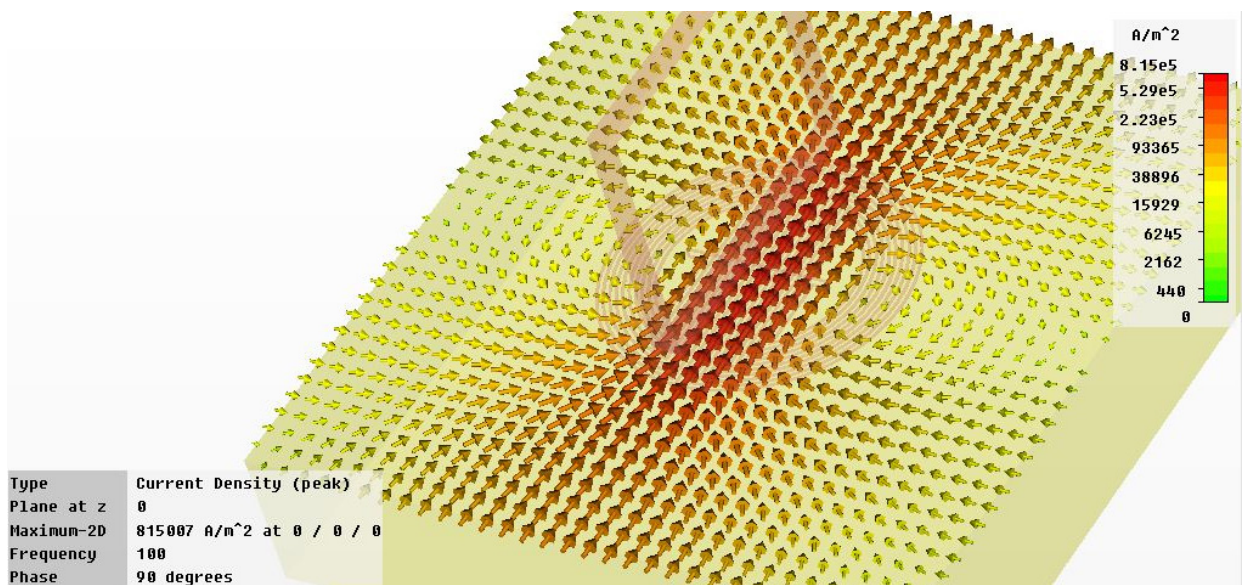


Figura 4.5 - Campo vectorial das CI provocado pela sonda IOnic no plano  $Z = 0$  mm com  $f = 100$  KHz com um desfasamento de  $90^\circ$  relativamente à corrente de excitação.

Todos os resultados obtidos nas simulações numéricas foram obtidos com um desfasamento de  $90^\circ$  relativamente à corrente de excitação, procedeu-se sempre deste modo para se trabalhar com os valores onde a derivada é máxima.

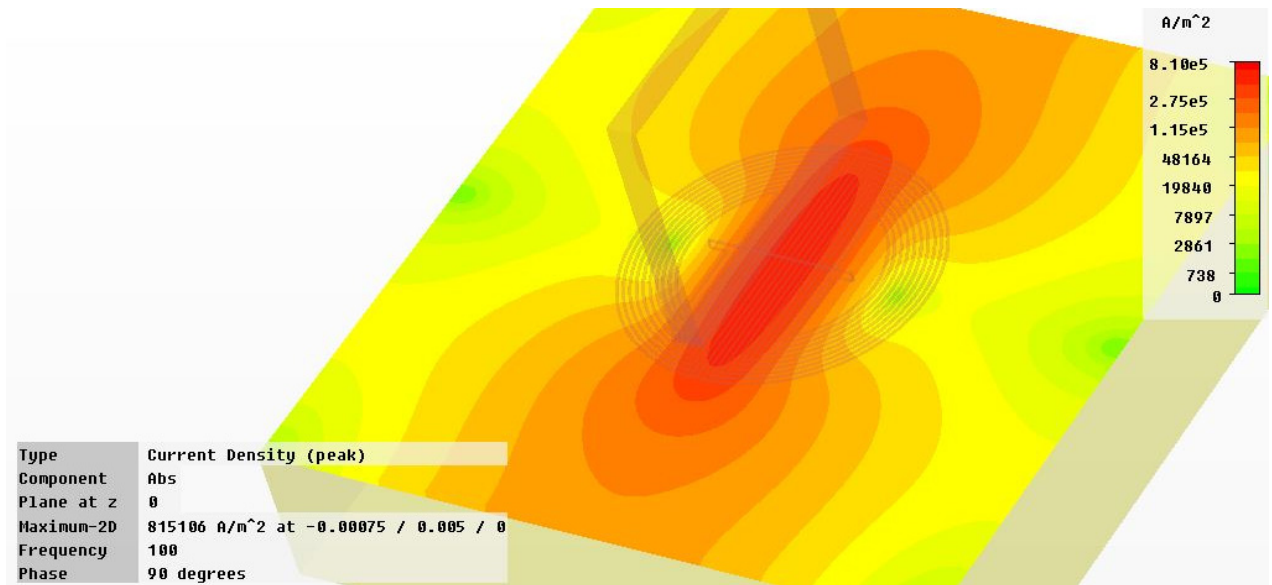


Figura 4.6 - Valor absoluto das CI da sonda IOnic no plano Z=0 mm com f=100 KHz e fase de 90 graus.

### 4.3 - Estratégia de simulação

Para uma melhor compreensão das condições de inspecção e dos seus parâmetros, criou-se uma matriz a qual se designou matriz das simulações. Esta é composta por seis simulações distintas pretendendo-se em cada uma delas avaliar um parâmetro e torna-lo padrão para que, as simulações se tornem menos exaustivas e assim poder perceber-se individualmente o efeito dos parâmetros estudados na matriz das sondas.

A matriz tem o objectivo de demonstrar numa primeira fase a importância das condições de inspecção que são subdivididas em:

- Tamanho do bloco.
- Tamanho do defeito.
- Espaçamento entre aquisições.
- *Lift-off* das bobinas sensíveis ao material base.

E numa segunda fase perceber a importância dos parâmetros de inspecção:

- Frequência.
- A corrente que atravessa o filamento de excitação.

A avaliação dos parâmetros um a um permite perceber e definir qual a melhor estratégia a adoptar para estudar o comportamento das doze sondas da matriz das sondas. Este estudo teve

por objectivo não só compreender o efeito da alteração de cada parâmetro, mas também qual o melhor valor de cada parâmetro e fixa-lo para que as simulações futuras tenham os parâmetros todos iguais, à excepção da geometria da sonda.

Com a matriz apresentada na Tabela 4.1 é possível estudar os diferentes efeitos de cada parâmetro e observá-los individualmente. Começou-se por estudar o efeito do tamanho do bloco e as condições de fronteira, e seguidamente cada uma das simulações numeradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Matriz das simulações, permite perceber individualmente o efeito das condições e dos parâmetros de inspecção.

Simulação	Condições de inspecção				Parâmetros de inspecção		
	Bloco Padrão=(2/3)Ø	<i>Lift-off</i> Padrão=200 µm	Defeito Padrão=300 µm	Espaçamento entre aquisições	Frequência Padrão=100 KHz	I Padrão=1 A	Sonda Padrão=#1
1	(2/3)Ø vs 2Ø	Padrão	15 µm	ΔX=1 mm	100 KHz 1 MHz	Padrão	Padrão
2	2Ø	Padrão	15 µm vs 300 µm	ΔX=1 mm	100 KHz 1 MHz	Padrão	Padrão
3	Padrão	Padrão	Padrão	2.5 mm	10 KHz 100 KHz 500 KHz 1 MHz 3 MHz 10 MHz	Padrão	Padrão
4	Padrão	50 µm 100 µm 200 µm 500 µm 1 mm 2 mm 3 mm	Padrão	2.5 mm	Padrão, 10 KHz 1 MHz	Padrão	Padrão
5	Padrão	Padrão	Padrão	2.5 mm	Padrão, 10 KHz 1 MHz	0.1 A 0.5 A 0.75 A 1 A 1.5 A 2 A	Padrão
6	Padrão	Padrão	Padrão	ΔX=0.5 mm	Padrão, 10 KHz 1 MHz	Padrão	Todas

#### 4.3.1 - Efeito do tamanho do bloco e condições de fronteira

Numa primeira fase era importante perceber se o tamanho do bloco do material base, onde se coloca a sonda, teria influência nos resultados obtidos. Era necessário perceber se o

*Software* CST studio suite considerava o bloco infinito, ou apenas com as dimensões que lhe eram atribuídas.

Para perceber a importância do tamanho do bloco realizou-se duas simulações: uma em que o bloco tem o dobro do diâmetro da sonda IOnic, e uma segunda com o bloco a dois terços do diâmetro da mesma sonda, fez-se a sonda percorrer um defeito com 300  $\mu\text{m}$  de largura e 2 mm de profundidade, até que este ficasse fora das bobinas sensíveis, as leituras foram realizadas com um afastamento de 1 em 1 mm. Os resultados obtidos são mostrados nas Figura 4.7 e Figura 4.8, apresentasse os resultados em dois gráficos pois foram realizadas simulações para duas frequências distintas.

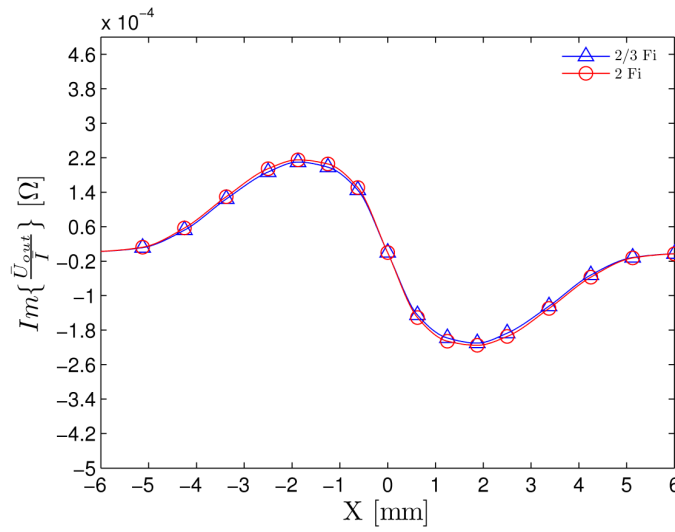


Figura 4.7 - Efeito do tamanho do bloco para uma frequência de 100 KHz.

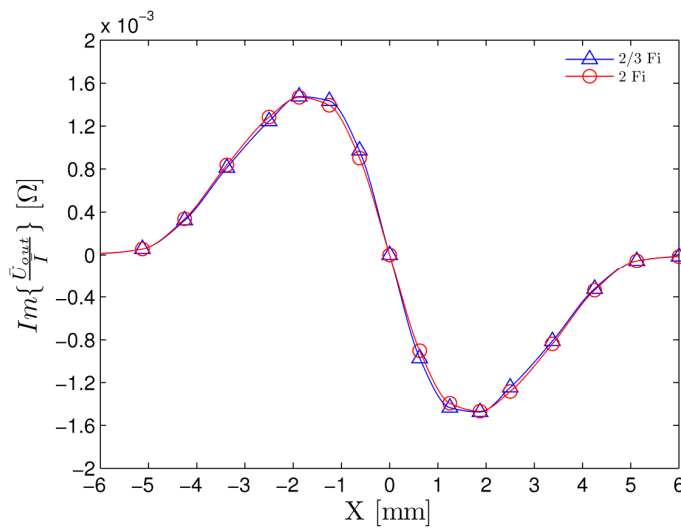


Figura 4.8 - Efeito do tamanho do bloco para uma frequência de 1 MHz.



Analisando os gráficos percebe-se que o tamanho do bloco do material base não têm influência para os resultados. A dimensão do bloco apenas nos ajuda a limitar o campo de resultados no espaço, podendo assim realizar-se uma análise mais detalhada, que envolve mais elementos de malha numa zona mais limitada.

Para comprovar este facto, realizou-se outra simulação, que consiste em envolver o bloco do material base num bloco com as propriedades eléctricas do ar, e comparar esta nova simulação com a obtida na Figura 4.5.

Colocou-se um bloco com as propriedades eléctricas do ar a envolver o bloco de material base como se esquematiza na Figura 4.9. Este bloco permite isolar o bloco de material base nas seis faces, bem como a sonda.

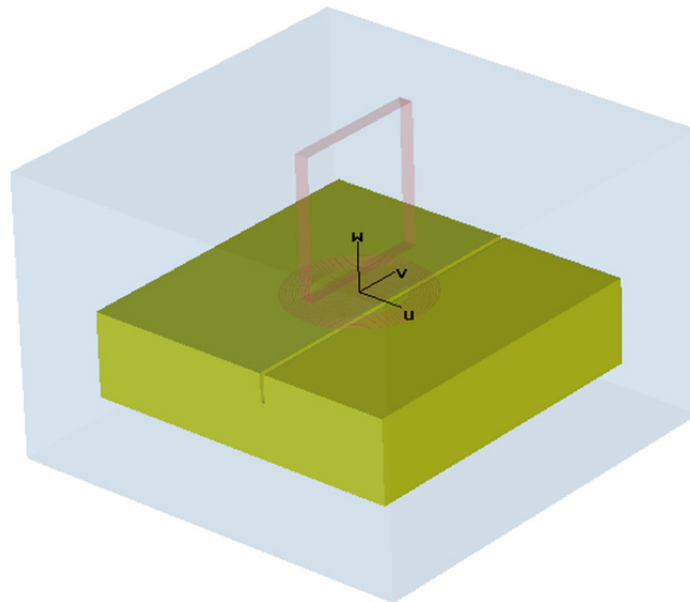


Figura 4.9 - Bloco de material base e sonda IONic envolvidos num bloco com as propriedades eléctricas do ar.

Ao comparar os dois resultados (Figura 4.10), percebe-se que as linhas de corrente que anteriormente entravam perpendiculares ao bloco, nesta simulação entram paralelas, isto permite concluir uma vez mais que o *Software* considera o bloco infinito. Essa é a condição fronteira por defeito.

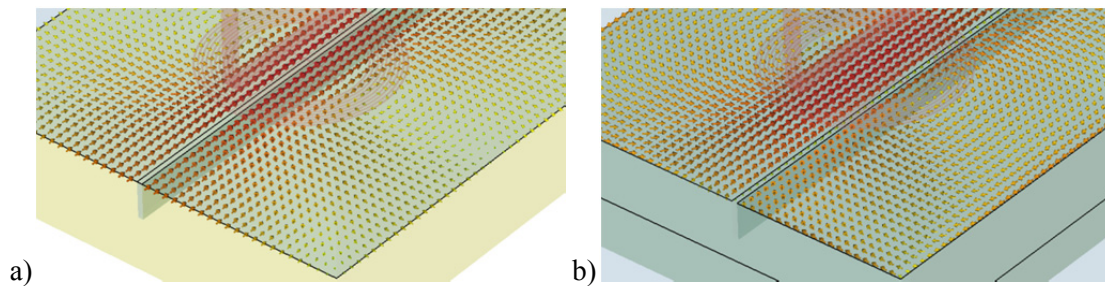


Figura 4.10 - Comparação do campo vectorial das CI provocadas pela sonda IOnic.

- a) Linhas do campo vectorial perpendiculares as faces laterais do bloco de material base (sem ar nas laterais).
- b) Linhas do campo vectorial paralelas as faces laterais do bloco de material base (com ar nas laterais).

#### 4.3.2 - Largura do defeito

Inicialmente foram realizadas umas simulações com um defeito de 15  $\mu\text{m}$  de largura e recolhem-se dados de 1 em 1 mm, com estas simulações os resultados obtidos traziam algumas dúvidas em relação ao que se esperava das sondas, isto deve-se ao facto de a malha na zona do defeito ser pouco refinada, pois o bloco é cerca de 730 vezes maior que o defeito, e como a malha é gerada uniformemente, poucos elementos são colocados dentro da zona do defeito, ou seja, o *Software* cria um ponto no material base (MB) e o outro ponto de malha encontrasse novamente no MB, não gerando um ponto no espaço que tem as propriedades do ar, o que faz com que o *Software* não reconheça que existe uma descontinuidade de material.

Os defeitos criados por eletroerosão que se encontram no Laboratório do DEMI da FCT-UNL têm uma largura de 300  $\mu\text{m}$ , este valor possibilita gerar uma malha uniforme no seu interior que permite ao *Software* perceber que existe uma descontinuidade de material.

Para tentar compreender fisicamente os efeitos da largura do defeito, realizou-se ensaios no *Software* CST, como este foi o primeiro ensaio a ser realizado o tamanho do bloco ainda não se encontrava na medida que se considerou padrão. A Figura 4.11 permite perceber o comportamento da sonda quando esta se desloca sobre o defeito de 15  $\mu\text{m}$  para uma frequência de 100 KHz, neste mesmo gráfico descreve-se o comportamento da sonda na detecção de um defeito de 300  $\mu\text{m}$ .

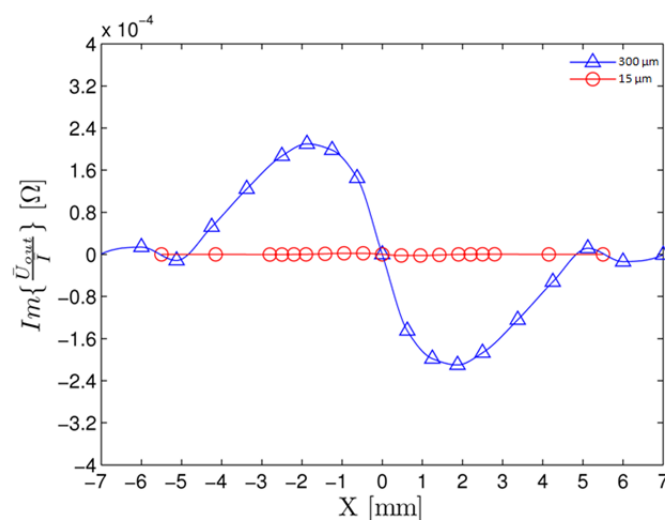


Figura 4.11 - Comparação do deslocamento da sonda IOnic sobre um defeito de 15  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ , para uma frequência de 100 KHz.

A Figura 4.12 mostra o comportamento da sonda na detecção dos dois defeitos, mas agora para uma frequência de 1000 KHz.

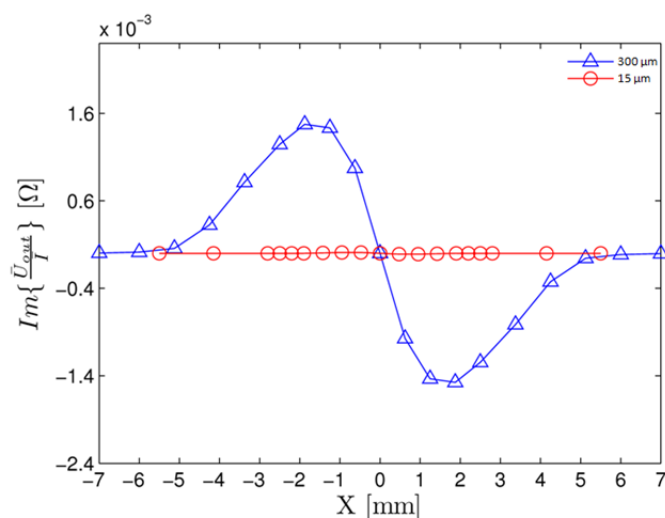


Figura 4.12 - Comparação do deslocamento da sonda IOnic sobre um defeito de 15  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ , para uma frequência de 1000 KHz.

Da análise das Figura 4.11 e Figura 4.12 percebe-se claramente que o defeito de 15  $\mu\text{m}$  não apresenta resultados satisfatórios para o tipo de estudo que se está a realizar, assim sendo tomou-se como padrão o defeito de 300  $\mu\text{m}$ . Apesar de se ter escolhido como defeito padrão os 300  $\mu\text{m}$ , a sonda IOnic tem a capacidade de detectar o defeito de 15  $\mu\text{m}$  com se verifica na

Figura 4.13, onde com um ajuste na escala do y, se consegue representar o comportamento da sonda a deslocar-se sobre o defeito.

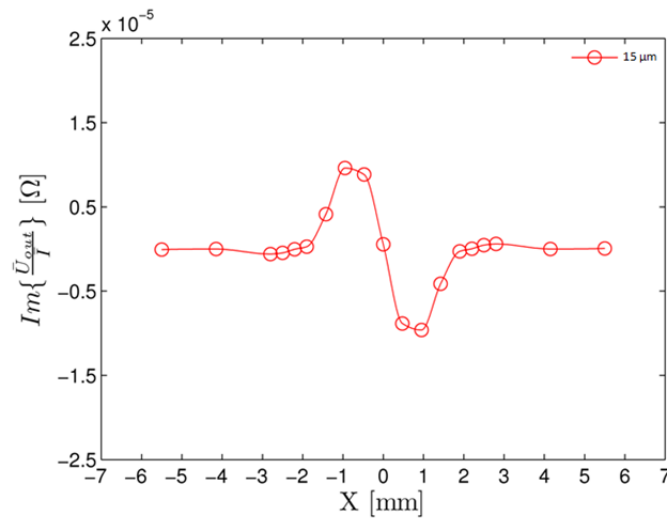


Figura 4.13 - Deslocamento da sonda IONic sobre o defeito de 15  $\mu\text{m}$ , para uma frequência de 1 MHz.

#### 4.3.3 - Espaçamento entre aquisições

Inicialmente começou-se por realizar, quer a simulação do efeito do tamanho do bloco quer a da largura do defeito. Com um afastamento entre defeitos de 1 em 1 mm, isto é, a sonda regista valores de impedância de 1 em 1 mm, porem para facilitar a inspecção e os resultados obtidos, não se fez deslocar a sonda, mas sim o defeito ao longo do bloco do material base, assim com a sonda fixa, o bloco vai variando a posição do defeito até este passar o diâmetro da sonda. Esta metodologia adoptada tem uma vantagem relativamente a movimentação da sonda sobre o defeito, que é o facto de a sonda nunca apanhar o ar que circunda o bloco do material base, não identificando assim essa falta de material como um defeito.

Observando a Tabela 4.1, percebe-se que o campo do afastamento entre defeitos, não tem um valor padrão, isto ocorre porque as duas primeiras simulações tem um  $\Delta X=1$  mm, na avaliação do efeito do *lift-off*, da frequência e da corrente, utilizou-se um afastamento de defeito constante, isto é, utiliza-se o defeito fixo a uma distância do filamento de excitação de 2.5 mm.

#### 4.3.4 - Frequências

Com todos os parâmetros congelados, realiza-se a variação das frequências, com o objectivo de perceber qual a melhor frequência para realizar as simulações futuras. A Figura 4.14 mostra o comportamento do sinal da sonda no plano de impedância eléctrica.

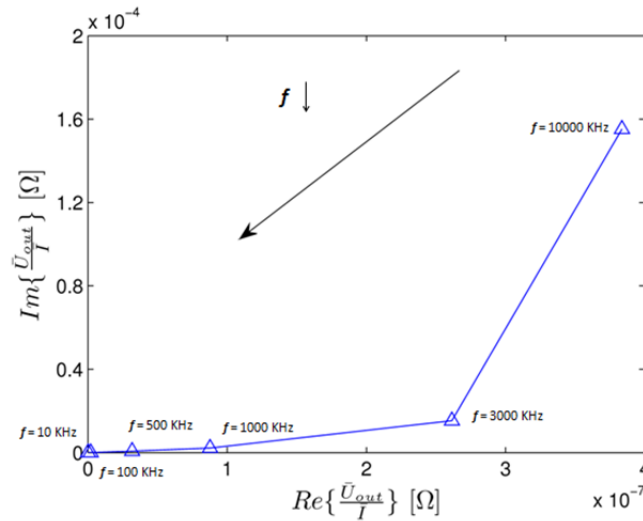


Figura 4.14 - Variação das frequências

O comportamento apresentado pelo gráfico representado na Figura 4.14 é um resultado esperado, e facilmente explicado pela Lei geral da indução, ou mais frequentemente chamada Lei de Faraday (4.1). A lei de Faraday [22], afirma que a força eletromotriz induzida num circuito fechado por um campo magnético, é proporcional ao número de linhas do fluxo que atravessa a área envolvida do circuito, na unidade de tempo, a lei permite concluir que uma maior frequência implica uma maior derivada em ordem ao tempo.

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (4.1)$$

Sabe-se que frequências na ordem do 10 KHz permitem uma maior penetração, detectando assim defeitos mais longe da superfície, e frequências na ordem dos 1 MHz são aconselháveis para detectar defeitos superficiais de pequenas dimensões. Como tal utilizou-se como frequência padrão três frequências: uma baixa (10 KHz) uma alta (1 MHz) e uma intermédia (100 KHz), isto permite ter uma perspectiva do comportamento de cada sonda nas diferentes gamas de frequência.

#### 4.3.5 - Variação do *lift-off* da sonda

A análise deste parâmetro de inspecção permitiu perceber que quanto maior for o *lift-off* da sonda em relação ao material base, menor o efeito sentido pela sonda nas bobinas sensíveis. O resultado da variação do *lift-off* é mostrado graficamente como uma linha recta com um declive negativo, e tem início em zero, este estudo foi realizado para as três frequências como esquematizado na Figura 4.15, onde cada linha representa uma frequência diferente.

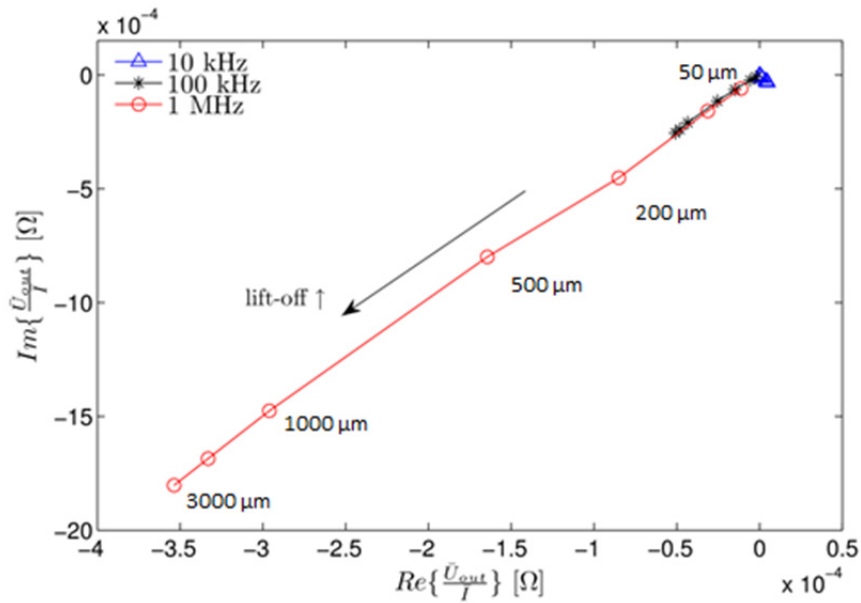


Figura 4.15 - Efeito da variação do *lift-off* para as frequências de 10, 100 e 1000 KHz.

As rectas do gráfico apresentado na Figura 4.15 têm todas início em zero, nesse ponto o *lift-off* estudado é o de 50  $\mu m$ , e a partir daí vai sempre a subir até 3000  $\mu m$ . O gráfico mostra a diferença máxima entre o valor de *lift-off* para 50  $\mu m$  e os restantes valores. O efeito de *lift-off* apresenta esta configuração gráfica porque as simulações foram realizadas com a sonda sobre um defeito, este mesmo estudo se fosse realizado com a sonda sobre material base livre de defeitos, o gráfico do efeito de *lift-off* seria apenas um ponto para qualquer que fosse o seu valor, isto deve-se ao facto de a sonda ter um efeito capacitivo.

Da observação gráfica pode-se também concluir que o efeito provocado pela componente imaginária é mais preponderante que a parte Real, apesar de o gráfico se encontrar com uma inclinação de 45°, isto acontece porque a escala da parte Imaginária está quatro vezes mais pequena que a parte Real.

O gráfico da Figura 4.15 apresenta uma escala adequada para a frequência de 1 MHz, o que faz com que o efeito provocado pela frequência de 10 KHz não seja tão fácil de interpretar,

assim sendo realizou-se um gráfico, que apresenta uma vista mais pormenorizada do início das três curvas de *lift-off*.

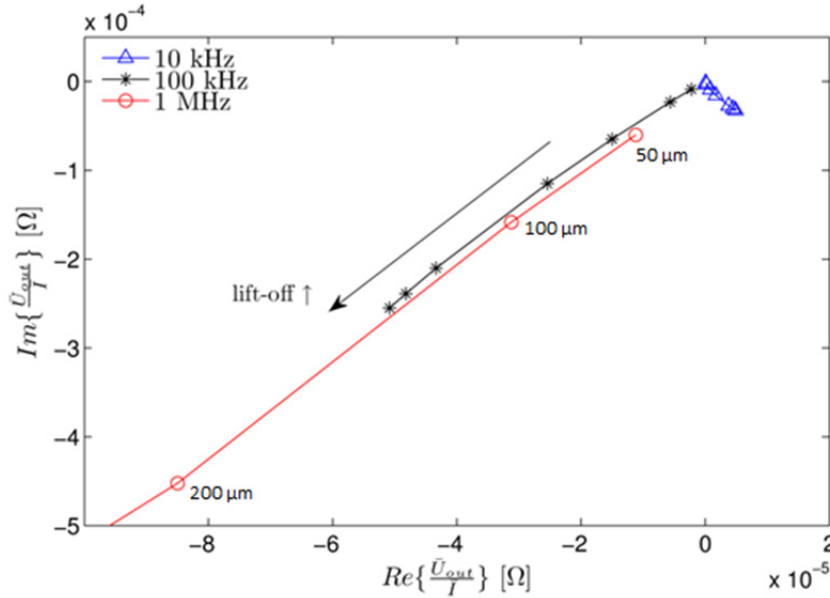


Figura 4.16 - Representação pormenorizada do início das três curvas de *lift-off*.

A Figura 4.16 mostra que para a frequência de 10 KHz a curva tem um comportamento contrário as restantes curvas, apresentando um declive negativo na mesma, mas com uma direcção positiva em relação ao eixo real.

#### 4.3.6 - Corrente

A avaliação do efeito da corrente corresponde à simulação 5 da Tabela 4.1 e tem como objectivo perceber a influência de variar a corrente que passa sobre o filamento de excitação. Neste estudo uma vez mais os campos acima analisados estão congelados no valor que se considerou padrão, com a excepção da frequência que se fez variar entre três valores: o padrão, 10 KHz e 1000 KHz.

Na Figura 4.17 mostra-se o comportamento da corrente para as três frequências referidas. Da observação gráfica pode-se concluir, uma vez mais, que o efeito provocado na componente imaginária é mais preponderante que na parte real, apesar de o gráfico se encontrar com uma inclinação de 45°, isto acontece porque a escala da parte Imaginária está numa ordem de grandeza maior que a da parte real.

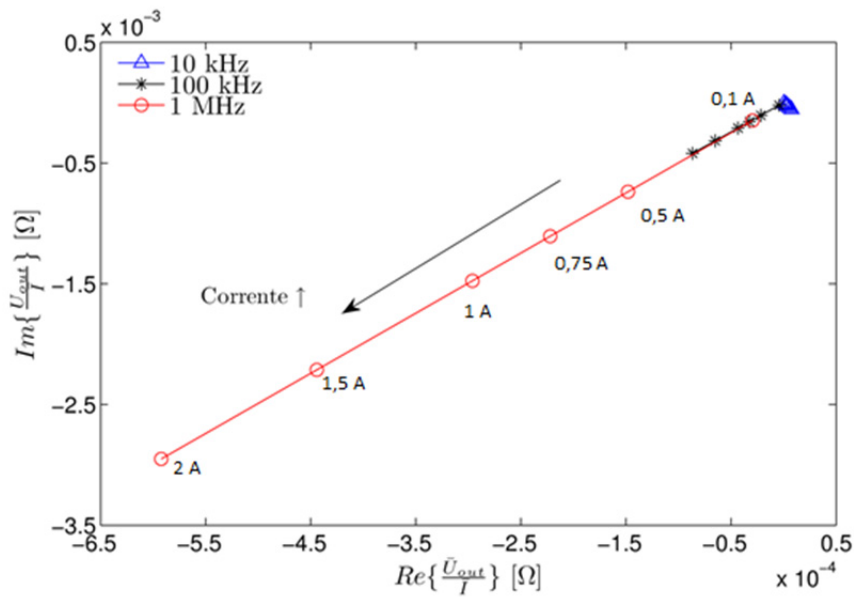


Figura 4.17 - Efeito da variação da corrente para as frequências de 10, 100 e 1000 KHz.

O gráfico da Figura 4.18 apresenta uma escala inadequada para a representação da curva dos 10 KHz. Apresenta-se uma vista pormenorizada do gráfico da Figura 4.18 que vai permitir perceber melhor o comportamento das três curvas no seu início, esta pormenorização é representada no gráfico da Figura 4.18, e mostra que a curva do 10 KHz tem um comportamento contrário as restantes curvas, apresentando um declive negativo, mas com uma direcção positiva em relação ao eixo real.

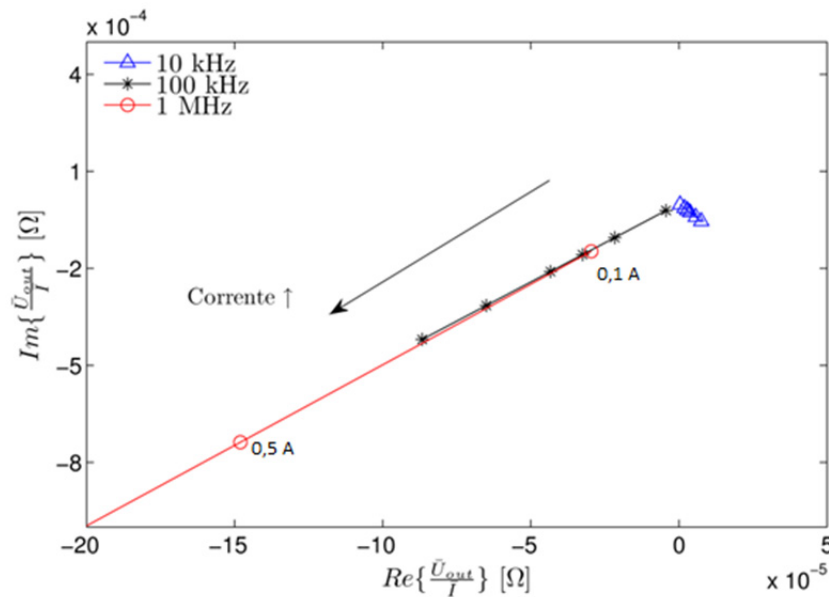


Figura 4.18 - Representação pormenorizada do início das três curvas da corrente.

O aumento da corrente gera um campo magnético mais intenso segundo a lei de Biot-Savart (4.2) já que estas duas grandezas são directamente proporcionais [22]. Logo tudo leva a



definir como corrente padrão, o valor de maior corrente, mas tem que se ter em conta as capacidades dos equipamentos do Laboratório do DEMI da FCT-UNL e o aquecimento que pode ser gerado no filamento de excitação. Assim sendo, define-se como corrente padrão de  $I = 1$  A para as restantes simulações.

$$|\vec{B}| = \frac{\mu i}{2\pi R} \quad (4.2)$$

#### 4.4 - Efeito do parâmetro E1 – Comprimento do filamento de excitação

Nos próximos sub-capítulos serão apresentados os resultados da modelação numérica relativa ao efeito de cada um dos seis parâmetros descritos na Tabela 3.2.

Numa tentativa de perceber o efeito do parâmetro E1, esquematiza-se os sinais das três sondas num Gráfico que permite perceber que não se tem um ganho significativo quando se aumenta o filamento para o dobro do tamanho do  $\emptyset$ . Da análise do gráfico observa-se que a redução para metade do filamento de excitação, é uma medida que revela pouca perda relativamente a sonda #1.

Este estudo foi realizado para três frequências, e é representado nos gráficos da Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21.

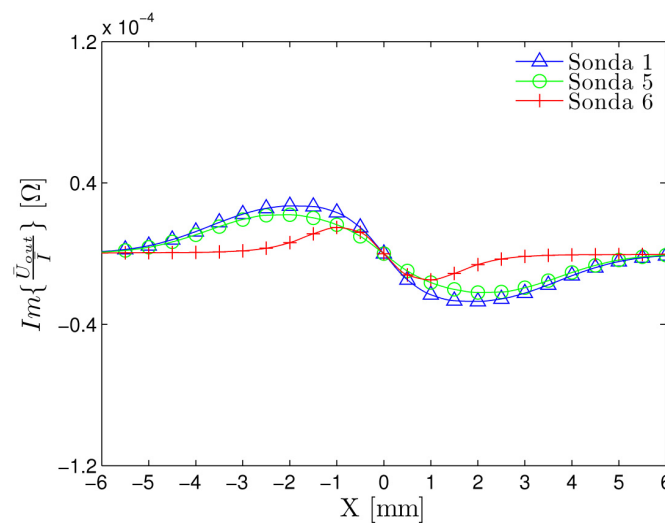


Figura 4.19 - Efeito E1 @  $f = 10$  KHz.

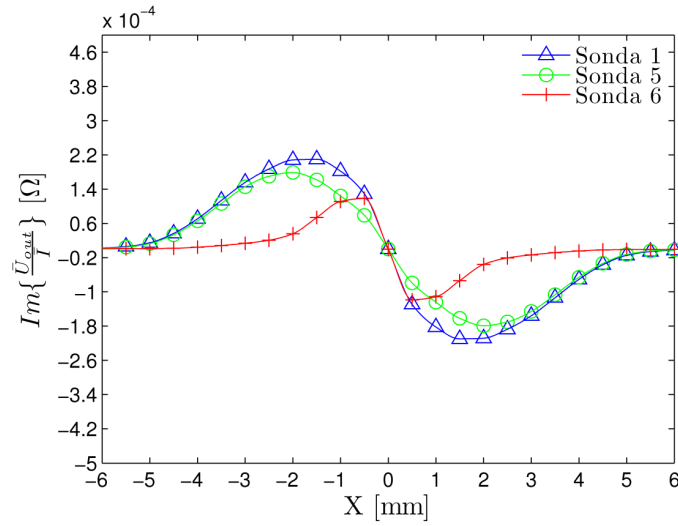


Figura 4.20 - Efeito E1 @  $f = 100 \text{ KHz}$ .

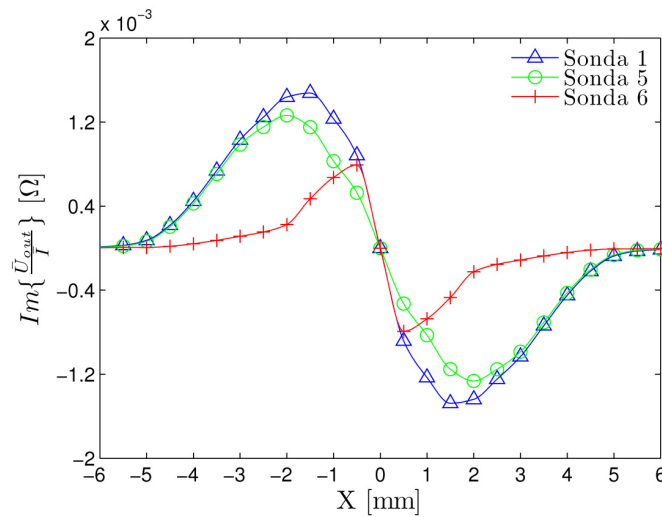


Figura 4.21 - Efeito E1 @  $f = 1000 \text{ KHz}$ .

Da Observação das três Figuras apresentadas anteriormente, percebe-se que o que varia é a amplitude devido as diferentes frequências. De salientar que a resolução espacial das três sondas não é a mesma, a sonda # 6 têm o seu sinal restrito de -2 a 2mm, enquanto as outras duas sondas se encontram com o sinal restrito de -5 a 5 mm.

## 4.5 - Efeito do parâmetro E2 – Espessura do filamento de excitação

Para avaliar o efeito do parâmetro E2 (espessura do filamento de excitação) relaciona-se as sondas #1 com a #7 e a #1 com a #8. Para melhor perceber o efeito deste parâmetro nas três sondas apresenta-se o resultado do sinal da sonda na Figura 4.22 que permite compreender que a espessura do filamento não traz ganhos relativos no comportamento da sonda, assim sendo uma espessura maior permite passar mais corrente com menos aquecimento do filamento, este estudo foi realizado para uma frequência de 10 KHz. As sondas apresentam o mesmo comportamento, porque o filamento de excitação encontra-se no plano superior do filamento de excitação.

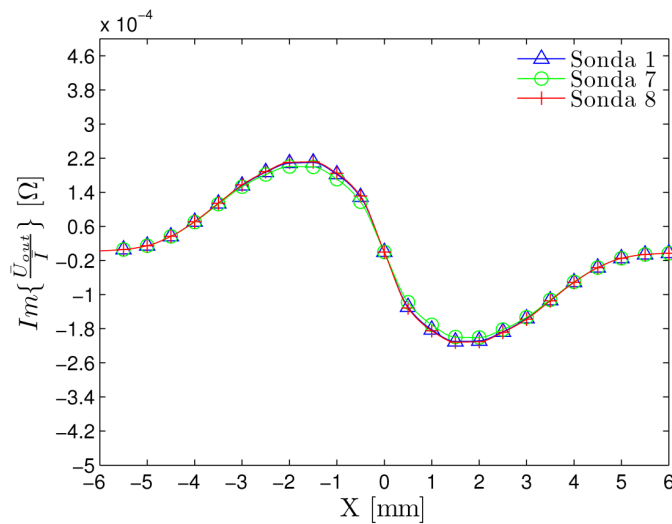


Figura 4.22 - Efeito E2 @ f = 10 KHz.

Nas Figura 4.23 e Figura 4.24 mostra-se que o efeito de E2, apresenta o mesmo comportamento para as frequências de 100 KHz e 1 MHz, variando apenas a sua amplitude.

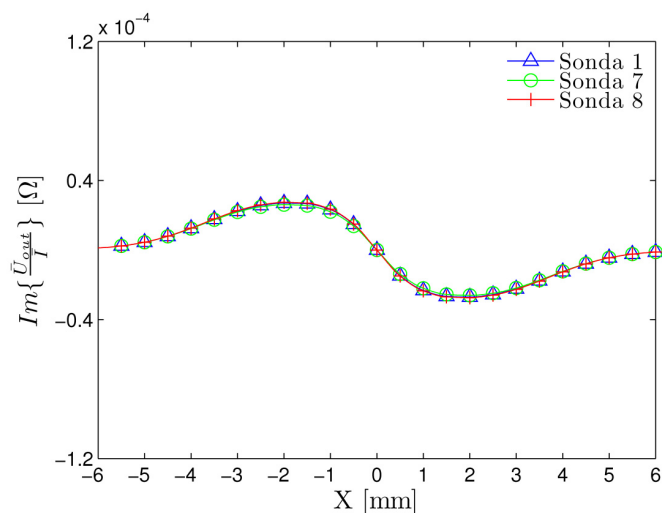


Figura 4.23 - Efeito E2 @ f = 100 KHz.

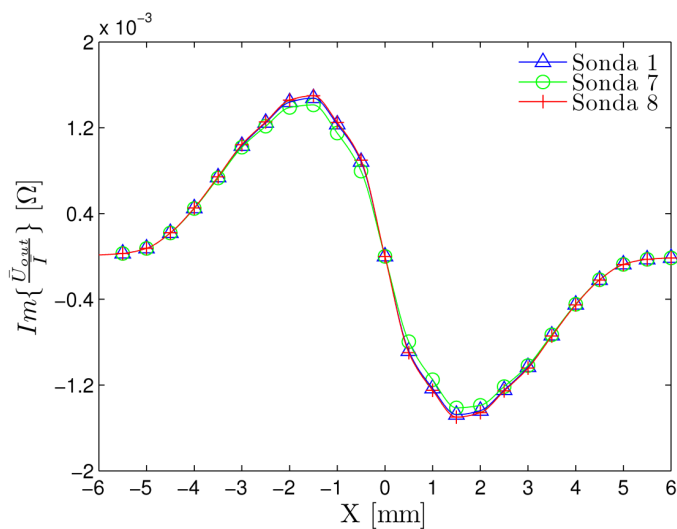


Figura 4.24 - Efeito E2 @ f = 1000 KHz.

#### 4.6 - Efeito do parâmetro E3 – Posição do filamento de excitação

Os efeitos do parâmetro E3 (posição do filamento de excitação) obtêm-se da relação entre as sondas #1, #2 e #12. Pode-se avaliar este efeito relacionando a sonda #1 com a #2, a sonda #1 com a #12, e ainda a sonda #2 com a #12, assim obtêm-se três relações distintas, esta redundância de resultados permite concluir com mais exactidão o efeito de E3 na sonda IOnic. Para melhor se perceber o efeito de E3 nas três sondas pode-se observar a Figura 4.25, de onde se conclui que o comportamento da sonda #1 com o filamento a 1400  $\mu\text{m}$  superior ao plano das bobinas sensíveis, tem o pior comportamento comparativamente as sondas #2 e #12. Outra conclusão que se pode retirar da avaliação da Figura 4.25, é que o sinal da sonda #12 é um

pouco melhor que o da sonda #2, apesar de pouco significativo, contudo a configuração da sonda #12 é mais favorável, pois permite uma aproximação das duas bobinas sensíveis, este estudo foi realizado para as três frequências que se tem vindo a referir.

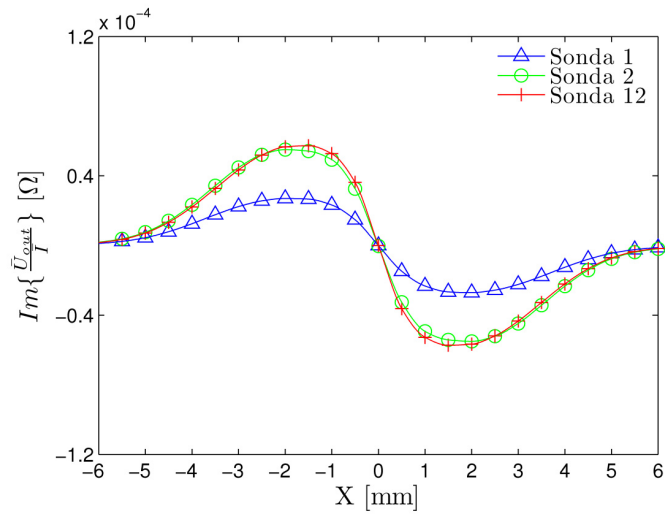


Figura 4.25 - Efeito E3 @ f = 10 KHz.

O comportamento das sondas para as frequências de 100 KHz e 1000 KHz é mostrado nas Figura 4.26 e Figura 4.27 respectivamente. Uma vez mais o comportamento apresentado pelas três curvas nas três frequências é idêntico, variando as amplitudes.

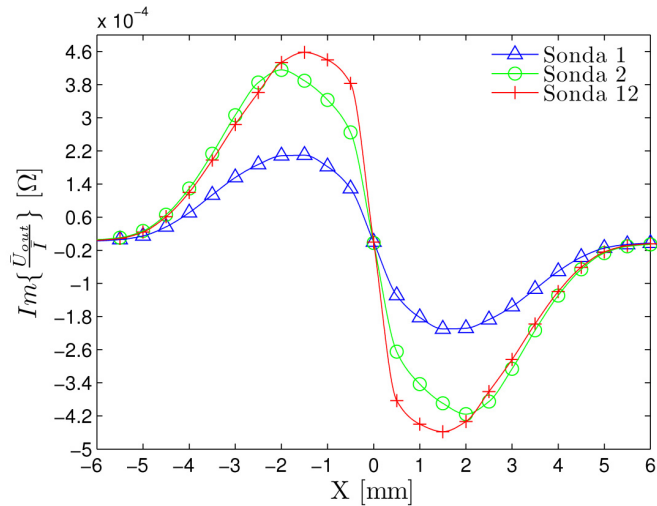


Figura 4.26 - Efeito E3 @ f = 100 KHz.

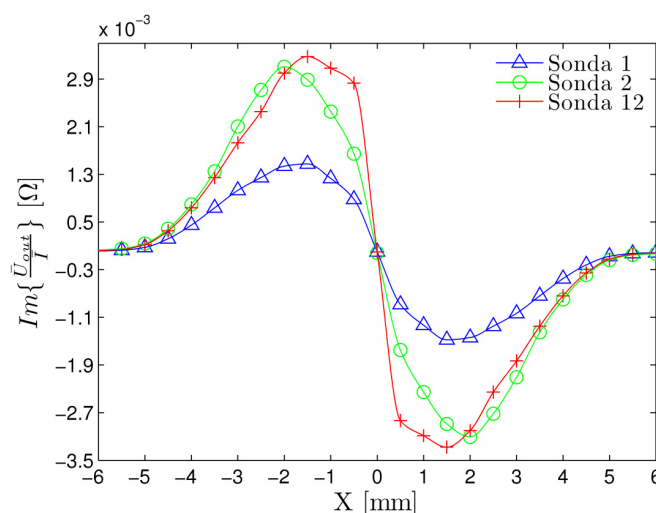


Figura 4.27 - Efeito E3 @ f = 1000 KHz.

## 4.7 - Efeito do parâmetro B1 – Espessura e Espaçamento das Bobinas Sensíveis

O efeito do parâmetro B1 (espessura e espaçamento) pode ser estudado relacionando as sondas #1 e #3, uma vez que este parâmetro não se encontra isolado em mais nenhuma relação de duas sondas, tem que se encontrar uma entidade onde se encontre o parâmetro B1, de preferência com apenas mais um parâmetro. Visto já se conhecer o efeito E3 e existir uma entidade que contem os parâmetros B1 e E3, vamos avaliar o efeito de B1 nessa mesma entidade, que relaciona a sonda #2 com a #3. Relacionando assim as 3 sondas entre si, torna-se mais perceptível o efeito do parâmetro B1. Olhando para a Figura 4.28, efeito de B1 para uma frequência de 10 KHz, este mostra que uma espessura de filamento de 50  $\mu\text{m}$  é mais favorável, este comportamento pode ser explicado, pois o número de segmentos que constituem as bobinas sensíveis passa para o dobro, logo maior área coberta por filamentos, melhor sinal por parte da sonda.

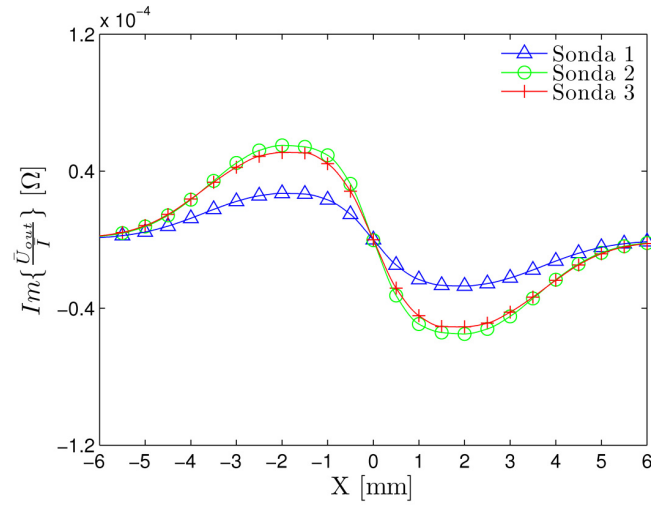


Figura 4.28 - Efeito B1 @  $f = 10$  KHz.

O mesmo estudo foi realizado para as frequências de 100 e 1000 KHz, de notar que o comportamento das sondas é idêntico para as três frequências, variando apenas a sua amplitude, este estudo está representado nas Figura 4.29 e Figura 4.30.

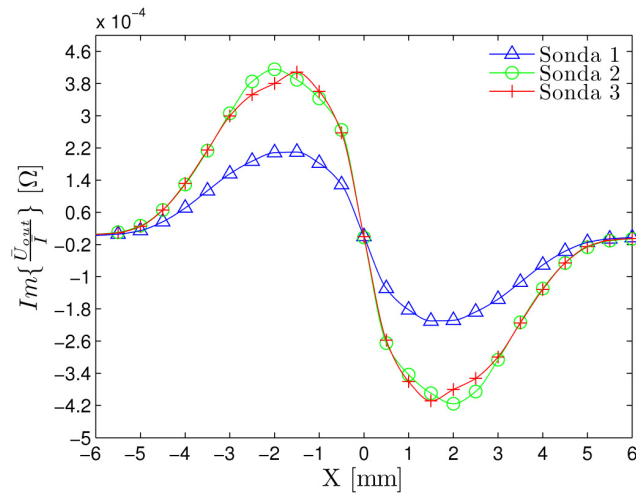


Figura 4.29 - Efeito B1 @  $f = 100$  KHz.

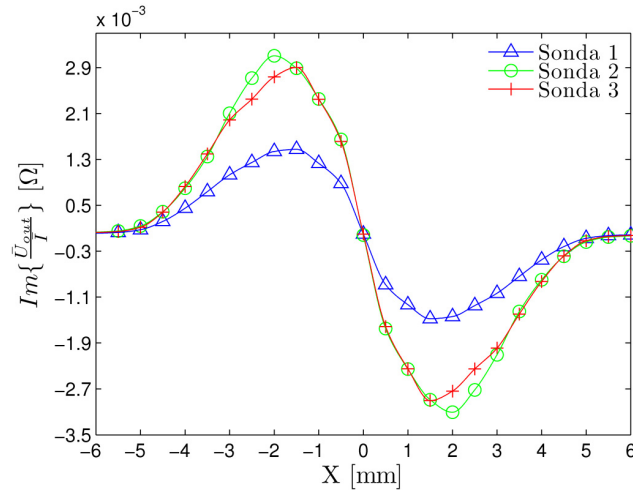


Figura 4.30 - Efeito B1 @ f = 1000 KHz.

## 4.8 - Efeito do parâmetro B2 – Número de espiras das Bobinas Sensíveis

O efeito do parâmetro B2 (nº espiras) relaciona-se com as sondas #1 e #4, e tal como para o parâmetro anterior, também este uma vez que não se encontra isolado, é necessário que se relacione com outras duas sondas. Utilizando o mesmo princípio descrito em cima, a entidade que se encontra com apenas dois parâmetros, relaciona a sonda #4 com a #5, e avalia não só o parâmetro B2, mas também o E1. A Figura 4.31 mostra o efeito do parâmetro B2 nas três sondas referidas anteriormente, para uma frequência de 10 KHz, da sua observação pode se concluir que, quanto mais espiras a sonda tiver, maior a sua amplitude, logo melhor comportamento na detecção de defeitos, este facto ocorre pois a área livre é menor, e essa é uma das grandes vantagens para esta configuração de sonda.



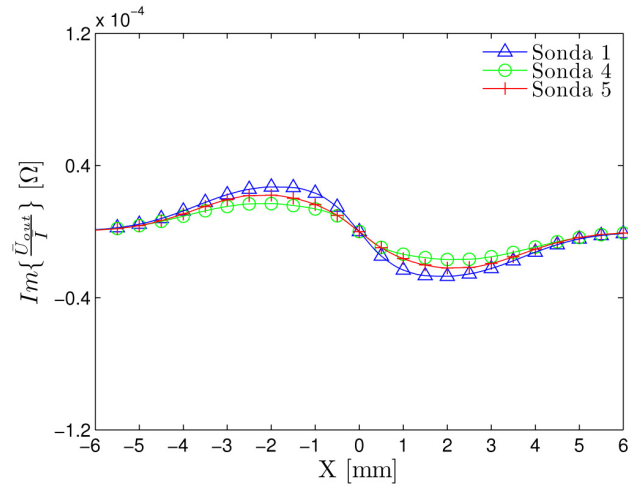


Figura 4.31 - Efeito B2 @ f = 10 KHz.

O mesmo estudo foi realizado para as frequências de 100 e 1000 KHz, uma vez mais o comportamento das sondas é idêntico para as três frequências, variando apenas a sua amplitude, como se pode perceber na Figura 4.32 e Figura 4.33.

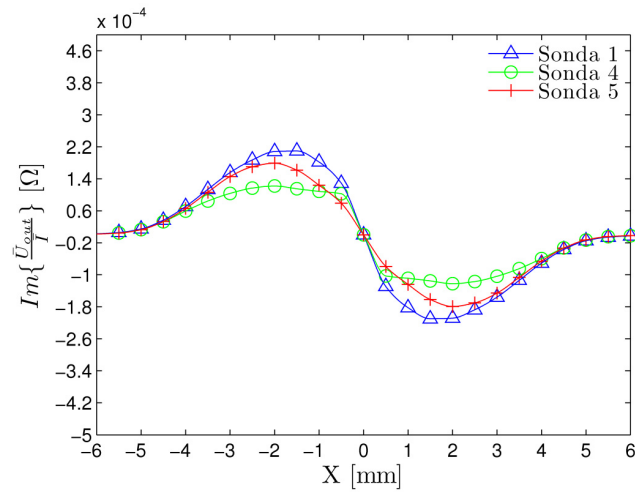


Figura 4.32 - Efeito B2 @ f = 100 KHz.

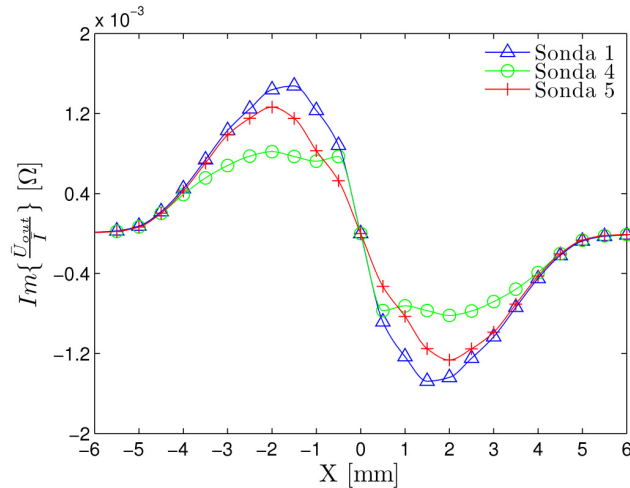


Figura 4.33 - Efeito B2 @ f = 1000 KHz.

#### 4.9 - Efeito do parâmetro B3 – Diâmetro das Bobinas Sensíveis

O efeito do parâmetro B3 ( $\emptyset$ ) pode ser estudado relacionando-se as sondas #1 com a #9, a #1 com a #10 e a #9 com a #10. Da observação da Figura 4.34, conclui-se que um maior diâmetro de sonda revela um melhor sinal, porém não pode ser linear esta leitura, porque ao mesmo tempo que se ganha uma maior área na curva do sinal da sonda, perde-se a possibilidade de se detectar um defeito que se encontre muito perto do primeiro, ou seja perde-se resolução espacial. Assim sendo para se obter um sinal claro da detecção de um novo defeito no material base, este para a sonda #10, tinha de estar afastado de 7 mm do primeiro, para não interferir na curva da detecção do primeiro defeito. Assim sendo a sonda #9 tem uma grande vantagem que é a possibilidade de detectar defeitos muito perto uns dos outros, sem que as curvas se intersectem. Confere assim um sinal limpo na detecção de defeitos.

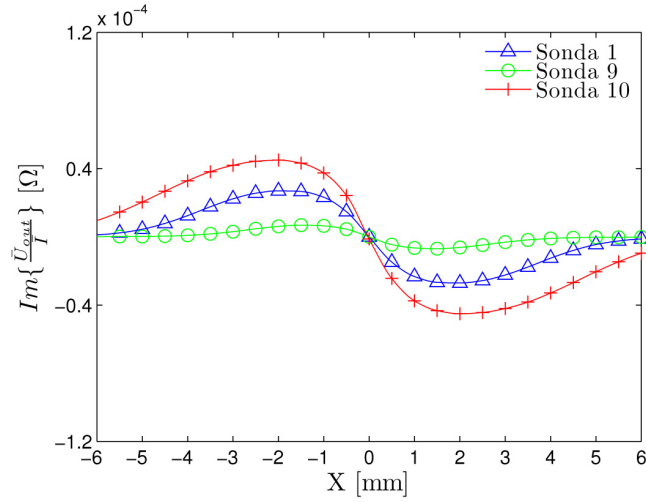


Figura 4.34 - Efeito B3 @ f = 10 KHz.

A Figura 4.34 apresenta o efeito de B3 para uma frequência de 10 KHz, como no estudo dos efeitos anteriores, neste também se realizou o estudo para as frequências de 100 e 1000 KHz, e esse estudo é apresentado na Figura 4.35 e Figura 4.36. De notar que o comportamento das sondas é idêntico para as três frequências, variando apenas a sua amplitude.

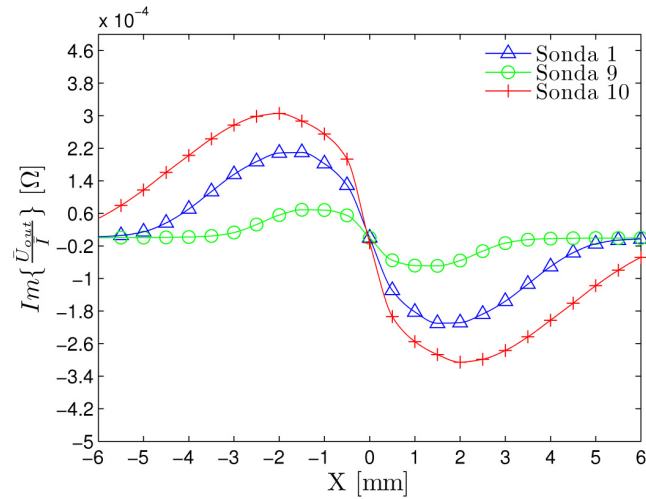


Figura 4.35 - Efeito B3 @ f = 100 KHz.

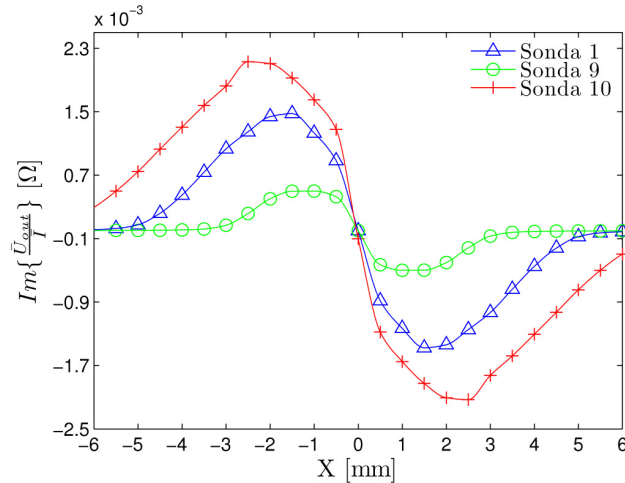


Figura 4.36 - Efeito B3 @ f = 1000 KHz.

#### 4.10 - Simulação dos comportamentos das diferentes configurações de sonda

Tendo-se anteriormente identificado os parâmetros que se considera padrão, caracterizou-se cada uma das doze sondas com base na matriz das sondas Tabela 3.2. Para a caracterização de sinal de cada uma das sondas, realizou-se 504 simulações de onde resultam 42 valores de impedância para cada uma das sondas. Dos 42 valores obtidos de notar que estes se dividem em 14 valores de impedância vezes as 3 frequências que se considerou para a realização do estudos, como se mostra na Tabela 4.1.

De notar que na simulação das doze sondas, o afastamento do defeito passa a ser de 500  $\mu\text{m}$  para se obter mais valores de impedância, isto resulta em 14 resultados de impedância por sonda como anteriormente referido, com a excepção da sonda #10 que tem um diâmetro maior, logo foi necessário realizar 18 leituras de impedância para que o diâmetro da sonda se encontre fora do defeito.

O estudo das doze sondas encontra-se representado na Tabela 4.1 com a simulação 6. As doze sondas vão ser avaliadas nas mesmas condições e nos mesmos parâmetros de inspecção como ficou definido pelo estudo efectuada anteriormente.

As simulações procedem-se como indicado anteriormente, fazendo-se mover o defeito no bloco do material base, e não a sonda sobre o defeito. Cada simulação dura em média uma hora e meia, o modelo de simulação apresenta em média 600,000 elementos de malha e os

cálculos para a obtenção da densidade de corrente eléctrica, realizaram-se com uma precisão de  $1 \times 10^{-6}$ .

Das simulações realizadas obtiveram-se vários valores de tensão induzida, o seu tratamento foi realizado graficamente, os gráficos obtidos permitem perceber o tipo de comportamento de cada sonda a capacidade de cada uma na detecção de defeitos, e o ponto onde essa detecção é máxima. Obteve-se um total de trinta e seis gráficos, no entanto para uma melhor interpretação dos resultados condensou-se a informação em seis gráficos.

Aplicando o critério descrito em § 3.5 seleccionaram-se as quatro sondas com melhor comportamento para uma frequência de 10 KHz cujos resultados estão expostos no gráfico da Figura 4.37, os resultados relativos as restantes oito sondas encontram-se no gráfico da Figura 4.38.

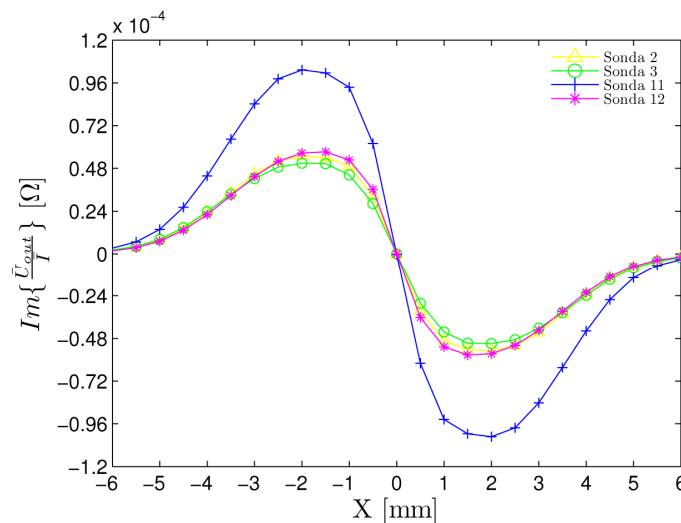


Figura 4.37 - Componente imaginária das quatro melhores sondas IONic ao longo de um defeito para uma frequência de 10 KHz.

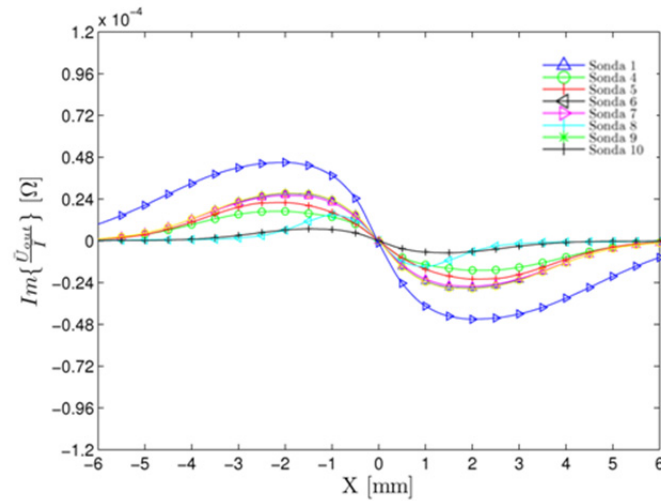


Figura 4.38 - Componente imaginária das oito restantes sondas IONic ao longo de um defeito para uma frequência de 10 KHz.

Seguindo a mesma estrutura de apresentação dos gráficos das Figura 4.37 e Figura 4.38 seguem-se os restantes quatro gráficos referentes aos resultados obtidos para as frequências de 100 KHz (Figura 4.39, Figura 4.40) e 1000 KHz (Figura 4.41, Figura 4.42).

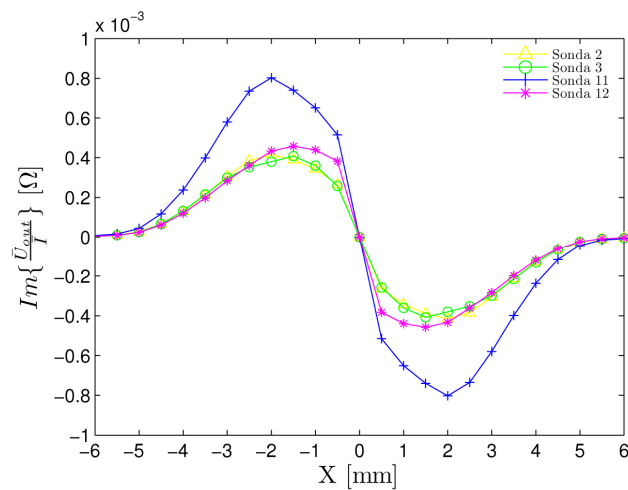


Figura 4.39 - Componente imaginária das quatro melhores sondas IONic ao longo de um defeito para uma frequência de 100 KHz.

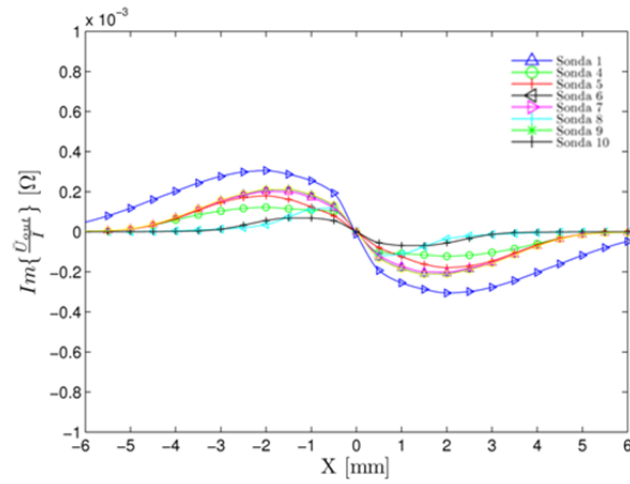


Figura 4.40 - Componente imaginária das oito restantes sondas IONIC ao longo de um defeito para uma frequência de 100 KHz.

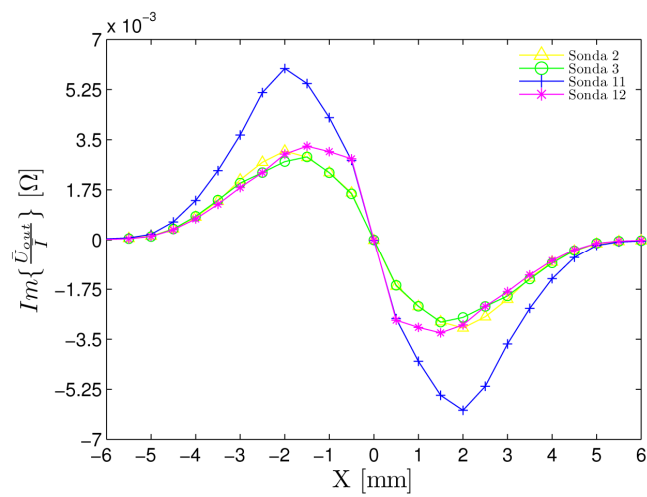


Figura 4.41 - Componente imaginária das quatro melhores sondas IONIC ao longo de um defeito para uma frequência de 1000 KHz.

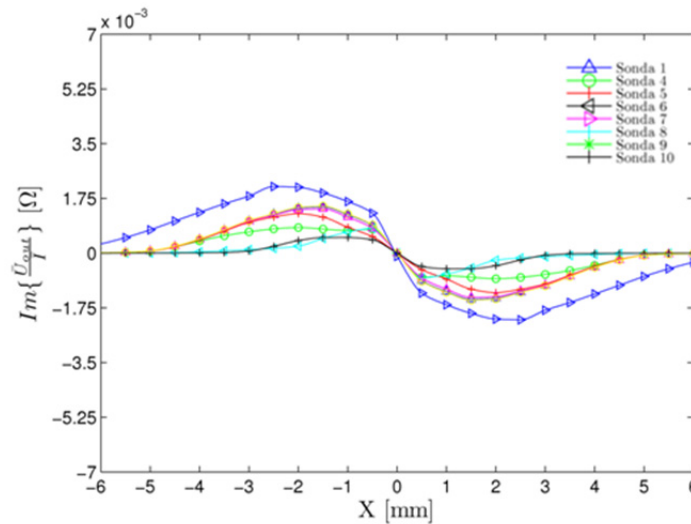


Figura 4.42 - Componente imaginária das oito restantes sondas IONIC ao longo de um defeito para uma frequência de 1000 KHz.

## 4.11 - Síntese do capítulo

Neste capítulo apresentou-se a modelação numérica dos fenómenos electromagnéticos das várias configurações da sonda IONIC. Esta modelação permitiu simular em 3D os campos magnéticos primários ( $H_p$ ), e os campos vectoriais das CI num bloco de material base com e sem defeitos. Concluiu-se que as correntes mais intensas se situam imediatamente abaixo do filamento de excitação no material base, e descrevem uma trajectória do tipo semicircunferência, com duas zonas de fraca densidade de corrente, em torno das quais as correntes circulam com uma trajectória tipo vórtice.

Criou-se uma matriz que se designou matriz das simulações que permitiu perceber individualmente o efeito das diferentes condições e dos parâmetros de inspecção. Avaliou-se individualmente cada parâmetro e percebeu-se a sua influência no comportamento da sonda. Cada simulação permitiu definir um valor padrão para as quatro condições de inspecção (tamanho do bloco, *lift-off*, tamanho do defeito e espaçamento entre aquisições) e para os dois parâmetros de inspecção (Frequência e corrente).

Criou-se um estudo que permitiu perceber que importância cada parâmetro tem no comportamento das sondas, e assim criar um padrão que permitiu realizar a avaliação das doze configurações de sonda.

Com as condições e os parâmetros de inspecção definidos, realizou-se as simulações das doze sondas com configurações geométricas diferentes, e definiu-se quais as sondas com melhor



comportamento e as que não trazem um ganho significativo comparativamente a sonda IOnic existente. Realizou-se o estudo das sondas por meio gráfico, onde se avaliou as quatro melhor num conjunto de três gráficos e as restantes noutra conjunto de três gráficos, cada um deles referente a uma frequência distinta.



## **5 - DESENVOLVIMENTOS EXPERIMENTAIS DE END POR CORRENTES INDUZIDAS**

### **5.1 - Introdução**

O trabalho desenvolvido neste capítulo teve por objectivo criar os meios laboratoriais de END compatível com as novas sondas IOnic por Correntes Induzidas e ajustado à contingência laboratorial em que foi realizado o trabalho experimental. Apresenta-se uma vista global desses meios, o *Software* onde os diagramas das sondas IOnic foram desenvolvidos e explica-se um pouco o seu funcionamento e as suas características mais relevantes.

A concepção e produção dos meios de locomoção são a par do desenvolvimento das novas sondas uma parte importante da presente dissertação, pois é este sistema que permite realizar as inspecções com um grau de exactidão elevado. Foi criada uma nova mesa XY para o LTI do DEMI, está com a característica de ser mais portátil, leve e com a possibilidade de se acoplar numa superfície vertical.

Paralelamente aos desenvolvimentos das sondas e dos meios de locomoção, foi desenvolvido um *Software* dedicado para coordenar todos os elementos do sistema. Para o sistema de END para as novas sondas IOnic de CI estar completo, falta a componente que permite gerar, adquirir e condicionar o sinal, este meio não foi desenvolvido, pois o LTI do DEMI já se encontrava equipado com este meio.

O carácter inventivo e os desenvolvimentos tecnológicos relevantes deste sistema dizem respeito sobretudo às variantes desenvolvidas da sonda IOnic, porém todos os elementos deste sistema têm a capacidade de se poderem adaptar a outras configurações de sondas de CI.

## 5.2 - Vista Global

Para realizar a validação experimental das sondas simuladas no *Software* CST studio suite, parte do sistema preliminar de END, foi desenvolvido em colaboração com o DEMI da FCT. O sistema é composto pelos seguintes componentes:

- Mesa XY para movimentar a sonda ao longo do material de teste;
- Gerador de sinais (já existente);
- Sondas IOnic (Correntes Induzidas);
- Electrónica Analógica (já existente);
- National Instruments DAQ USB-6251 para aquisição de dados e controlo dos motores da mesa XY (já existente);
- *Software* de controlo e análise desenvolvido em LabVIEW (para processar e guardar os sinais adquiridos e controlo da mesa XY) (já existente).

Na Figura 5.1 está representada a arquitectura do sistema de END utilizado para a aquisição do sinal das sondas. Nos quadrados vermelhos mostra-se os pontos importantes do desenvolvimento da presente dissertação. São eles o desenvolvimento e concepção de novas configurações de sonda IOnic, a mesa XY que permite movimentar a sonda sobre o material de teste e o *Software* dedicado, que permite controlar e analisar os sinais das sondas.

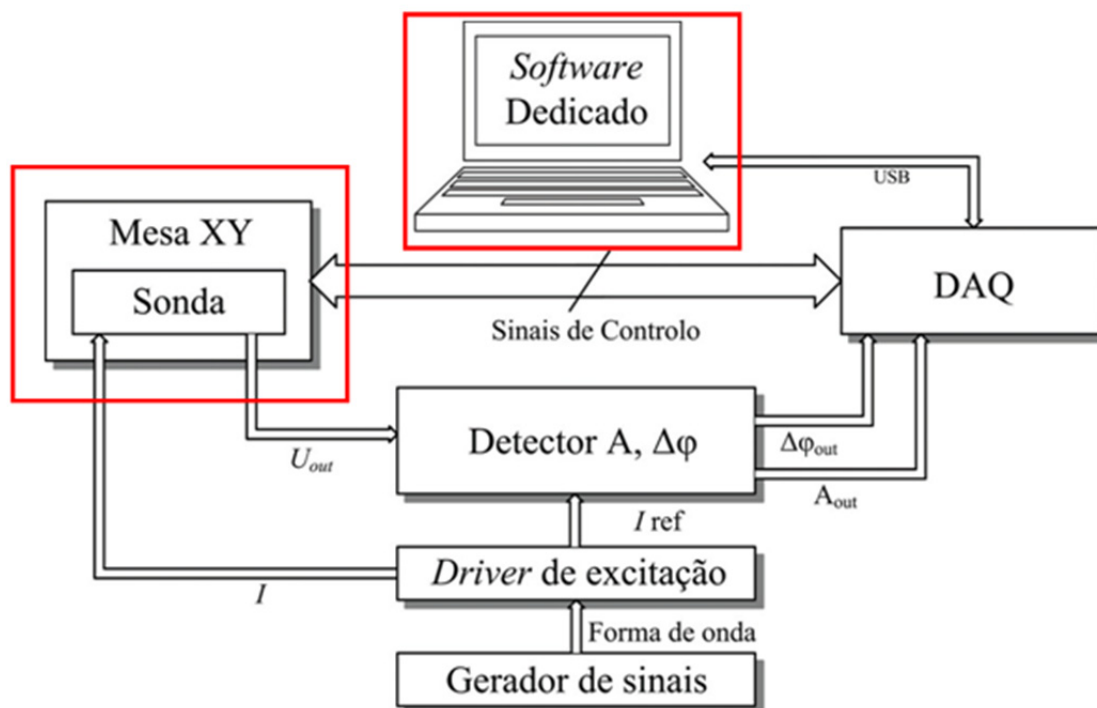


Figura 5.1 - Representação esquemática do sistema global de END por CI [3].

### 5.3 - Produção das sondas IOnic

Com o estudo realizado no Capítulo 4 ficou demonstrado que as sondas com melhor comportamento foram as sondas #2, #3, #11, #12. Assim sendo, são estas quatro sondas que vão ser produzidas em PCB para se poder realizar a sua validação, isto é, irão ser realizados ensaios em provetes com defeitos padrão idênticos aos produzidos no *Software CST studio suite*, com o objectivo de comparar as curvas obtidas numericamente com as experimentais e assim poder validar as simulações e as sondas.

Para se produzir as seis sondas, foi necessário realizar um projecto onde se desenhou seis mascaras com as configurações das sondas. Estas mascaras representam a geometria da sonda, onde estão incorporadas as pistas das sondas, os espaços em vazio da sonda e os furos onde se iram ligar os terminais que serviram para excitar a sonda e para receber o sinal. Para a realização das seis mascaras recorreu-se a um novo *Software Altium Designer 2009*.

Neste *Software* é possível criar diferentes mascaras, começa-se por criar as bobinas sensíveis, que são compostas por segmentos rectos e meias circunferências com as medidas especificadas anteriormente, as duas metades podem ser criadas ao mesmo tempo, pois encontram-se no mesmo plano. Em seguida cria-se o filamento de excitação, este é constituído

por um único segmento recto, e as suas medidas são específicas dependendo da sonda que está a ser desenhada. O filamento é desenhado posteriormente pois encontra-se num plano superior ao plano das bobinas sensíveis, este é uma das particularidades interessantes deste *Software*, permite criar uma sonda em camadas separadamente e no fim acoplar as diferentes mascarar. Assim depois da mascara das bobinas sensíveis e do filamento de excitação estarem criados, pode-se chamar os dois ficheiros e sobrepor o filamento de excitação é coloca-lo á distância de 200  $\mu\text{m}$  para a sonda # 12 ou a 1400  $\mu\text{m}$  para a sonda # 3.

Nas sondas # 2 e # 11, as bobinas sensíveis e o filamento de excitação podem ser criados em simultâneo, pois encontram-se no mesmo plano. Na Figura 5.2 encontra-se o aspecto gráfico de uma das sondas desenhada no *Software*.

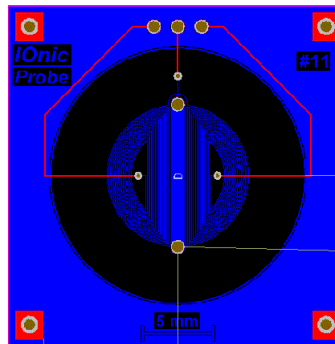


Figura 5.2 - Projecto da sonda IOnic número #11

Na Figura 5.2, mostra-se que a sonda IOnic encontra-se no centro da placa e foi criada por segmentos rectos e semicircunferências, a geometria da sonda encontra-se representada pela cor azul que significa que é constituída por cobre. As zonas que se encontram a negro significam que o cobre foi retirado, ficando no material base do circuito, as zonas vermelhas são constituídas por cobre, as zonas circulares castanhas são furos metalizados revestidos a cobre, para que seja possível realizar as ligações que vão permitir excitar a sonda e recepcionar o seu sinal.

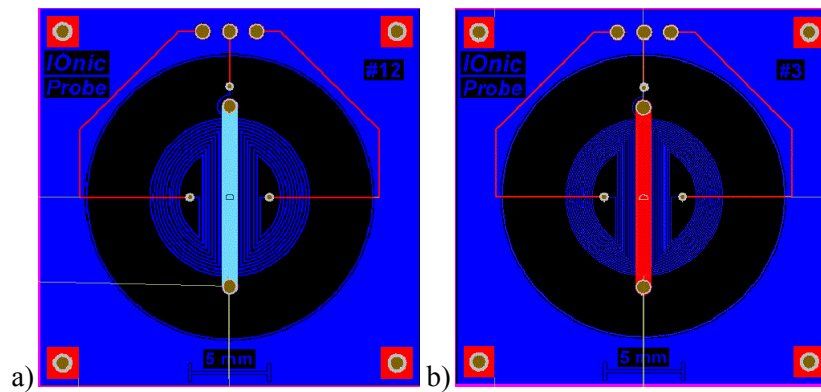


Figura 5.3 - Projecto da sonda IOnic.

- a) Sonda IOnic #12 com o filamento de excitação a 200  $\mu\text{m}$ . b) Sonda IOnic #3 com o filamento de excitação a 1400  $\mu\text{m}$ .

O *Software* utiliza diferentes cores, permitindo assim identificar em que plano do substrato de PCB se está a realizar a máscara. De acordo com a convenção utilizada pelo *Software*, a cor azul indica um plano na superfície inferior do substrato de PCB, e a cor vermelha mostra a superfície superior do substrato de PCB, como representado na Figura 5.3. Um plano intermédio (cerca de 200  $\mu\text{m}$  do plano inferior) é representado pelo *Software* pela cor azul claro, como se representa na Figura 5.3 a).

Observado a sonda # 11 da Figura 5.2 verifica-se que os filamentos que a constituem se encontram todas no mesmo plano, pois toda a sua geometria se encontra projectada a azul. Nas sondas apresentadas na Figura 5.3 observa-se que o filamento de excitação se encontra num plano intermédio, logo representado pela cor azul claro (Figura 5.3 a)), e num plano superior (1400  $\mu\text{m}$ ), representado pela cor vermelha (Figura 5.3 b)).

Para uma melhor percepção das dimensões da sonda, foi impresso no substrato um factor de escala que se encontra representado na parte inferior e tem a dimensão de 5 mm, foi também impresso o número da sonda e o nome da mesma, como apresentado na Figura 5.2.

No desenvolvimento do projecto da sonda para a sua produção em PCB, utilizou-se uma vista mais técnica das sondas (Figura 5.2), mas o *Software* tem a opção de as visualizar no seu aspecto final, como se mostra na Figura 5.4.

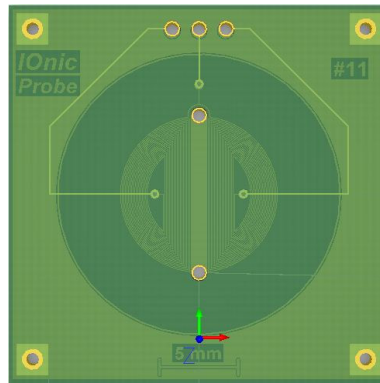


Figura 5.4 - Representação do aspecto final da sonda IOnic no *Software Altium Designer 2009*.

## 5.4 - Caracterização dos protótipos da sonda

Os protótipos da sonda foram produzidos com a tecnologia Printed Circuit Board (PCB)<sup>9</sup>. A produção foi encomendada a uma empresa Inglesa designada Trackwise [25].

A necessidade de produzir a sonda recorrendo a uma empresa estrangeira, em vez de se produzir nos meios existentes no DEEC do IST – Taguspark, prende-se com os seguintes factores:

- A existência de pistas com 50  $\mu\text{m}$  de espessura e de espaçamento, o que é difícil de produzir;
- A existência de furos metalizados e multi-camadas, o que também oferece alguns constrangimentos de produção.
- A qualidade global e a quantidade pretendida (cerca de 15 exemplares de cada uma das seis configurações de sonda).

O circuito impresso consiste numa placa que pode ser de fenolite, fibra de vidro fibra de poliéster, ou filme de poliéster, que possui a superfície coberta, numa ou nas duas faces, por uma fina película de cobre, prata ou ligas à base de ouro, níquel, entre outras, nas quais são

<sup>9</sup> A invenção do circuito impresso é atribuída a um engenheiro austriaco de nome Paul Eisler, que, no ano de 1936, enquanto trabalhava em Inglaterra, desenvolveu uma parte de um conjunto de rádio. Porém, só no decorrer da segunda guerra mundial, este tipo de produção causou impacto na criação de rádios robustos, vindo a ser comercializável no fim da segunda guerra em 1948. Este tipo de circuitos foi criado como substituto das antigas pontes onde se fixavam os componentes electrónicos que, em montagem, eram denominadas de “aranha” dada a sua aparência final.



desenhadas as pistas<sup>10</sup> condutoras que representam o circuito tal como apresentado na Figura 5.5.

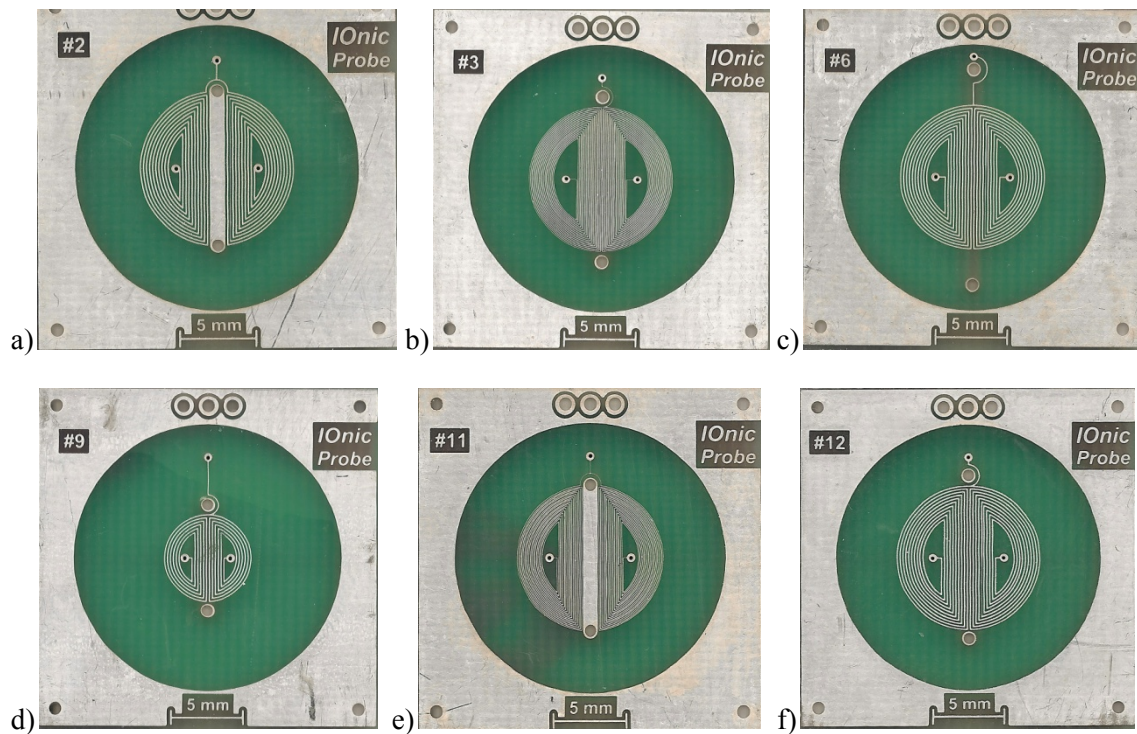


Figura 5.5 - Novas sondas IONic produzidas.

a) Sonda IONic #2, b) Sonda IONic #3, c) Sonda IONic #6, d) Sonda IONic #9, e) Sonda IONic #11, f) Sonda IONic #12

As sondas produzidas no âmbito da presente dissertação foram criadas por um processo de transferência de imagem. Neste processo utiliza-se um filme com as imagens do circuito, a partir do qual é feita a exposição na expositora e onde se processa a transferência do filme para o circuito, método semelhante ao conhecido como serigrafia, com a diferença que neste caso são utilizados raios ultra-violeta para fazer essa transferência, e são revelados com banhos químicos.

No fim do processo, tal como adiantado no parágrafo anterior, as sondas têm de passar por um banho químico, também chamado de corrosão que pode ser realizada por meio de uma imersão ou por jacto de solução química. Depois de a película ter o desenho marcado, é necessário dar evidência a este, o que torna a corrosão necessária na superfície metalizada da placa, a corrosão apenas ocorrerá na superfície nua, isto é, na superfície que não está coberta por tinta ou emulsão fotográfica queimada e revelada.

Para que as sondas se encontrem aptas à realização dos testes, têm ainda de passar por um banho de água corrente para que o excesso de tinta seja removido e, após, secas devem ser

<sup>10</sup> Atribui-se nome de pistas as linhas verticais e circunferências que constituem a bobina sensível da sonda.

polidas com uma esponja de aço bem fina. Resta assim a perfuração das pequenas ilhas, onde se colocam os fios que permitem as sondas serem excitadas e realizarem a recepção dos sinais.

Na Tabela 5.1 representa-se as características eléctricas e físicas das seis sondas produzidas em PCB.

Tabela 5.1 – Características eléctricas e físicas das seis sondas produzidas em PCB

Sondas	Características Eléctricas		Características Físicas					
	Resistência eléctrica Filamento de excitação [Ω]	Resistência eléctrica das bobinas sensíveis [Ω]	Peso [g]	Espessura do cobre [μm]	Espessura do substrato [μm]	Dimensões [mm]	Espessura das pistas [μm]	Plano de massa [Ω]
#2	0.10	3.82	1.81	30	1600	240x240	100	0.10
#3	0.10	22.10	1.77	30	1600	240x240	50	0.10
#6	0.10	5.14	1.78	30	1600	240x240	100	0.10
#9	0.10	1.93	1.78	30	1600	240x240	100	0.10
#11	0.10	21.48	1.77	30	1600	240x240	50	0.10
#12	0.10	4.15	1.79	30	1600	240x240	100	0.10

## 5.5 - Dispositivo automatizado de locomoção e posição das sondas

A criação de uma nova configuração de mesa XY justifica-se pela necessidade de se atingir os seguintes requisitos técnicos:

Portabilidade - este foi um dos aspectos importantes na projecção da mesa, pois tinha de ser leve, fácil de montar e transportar;

Modularidade e adaptação a diferentes situações de inspecção (materiais, componentes, geometrias, posições) - este foi um aspecto importante pois queria-se que a mesa pudesse realizar inspecções em diferentes superfícies com diferentes geometrias;

Eixo X de maior velocidade e não auto-bloqueado (correia) e um eixo Y para permitir varrimentos matriciais de maior precisão e auto-bloqueado (sem fim).

Possibilidade de adaptação de diferentes sondas de CI, nomeadamente sondas tipo *pencil Probe*, sondas planares e sondas em substrato flexível tipo Kapton®.

Baixos custos de aquisição.

Apesar de existir uma mesa X disponível no Laboratório do DEMI da FCT-UNL, esta não cumpre alguns requisitos importantes anteriormente mencionados. Assim foi concebida, projectada e produzida uma nova mesa XY com seis configurações possíveis, como se mostra no esquema da Figura 5.6.

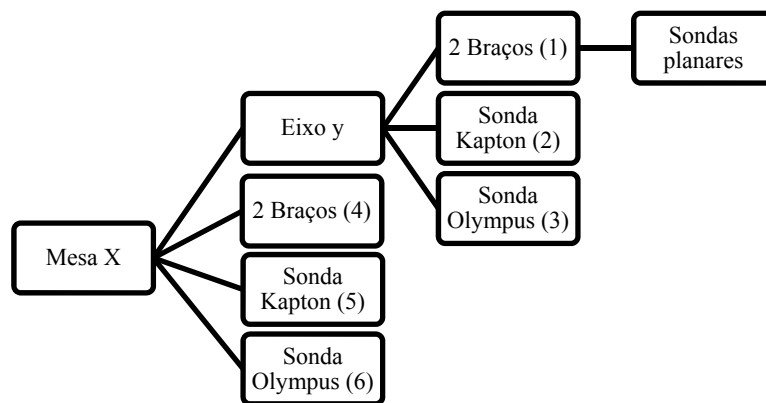


Figura 5.6 - Esquema representativo das configurações possíveis da mesa XY.

Observa-se que a mesa permite adoptar as configurações mostradas no Esquema da Figura 5.6, o ponto (1) mostra uma configuração de mesa em que existe a possibilidade de a sonda acoplada se poder deslocar nos dois eixos x e y e esta está acoplada ao sistema móvel por meio de dois braços (Figura 5.7), no ponto (2) a mesa tem a possibilidade de se deslocar novamente segundo os dois eixos com uma sonda *Kapton*, acoplada ao sistema móvel da mesa (Figura 5.8), na configuração (3) uma vez mais a mesa tem a possibilidade de se deslocar nos dois eixos, mas com a sonda *Pencil Probe* da *Olympus* acoplada (Figura 5.9).

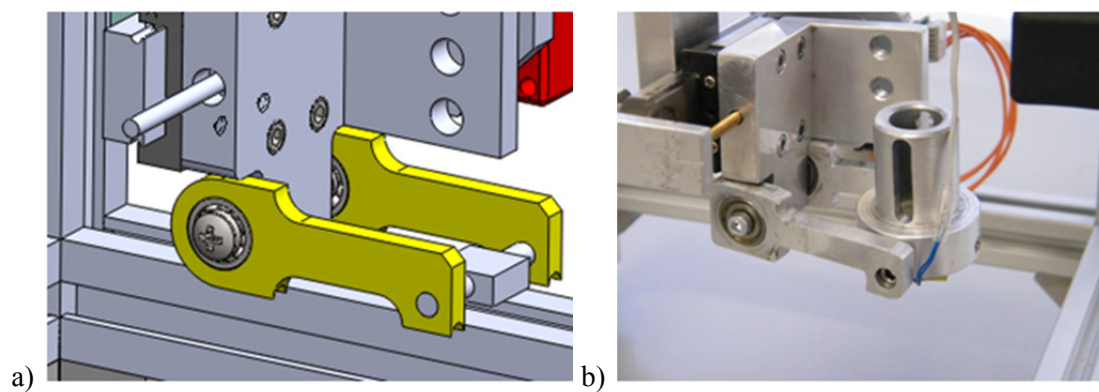


Figura 5.7 - a) Representação esquemática em desenho 3D da sonda planar acoplada á mesa. b) Foto da sonda planar acoplada a mesa XY.

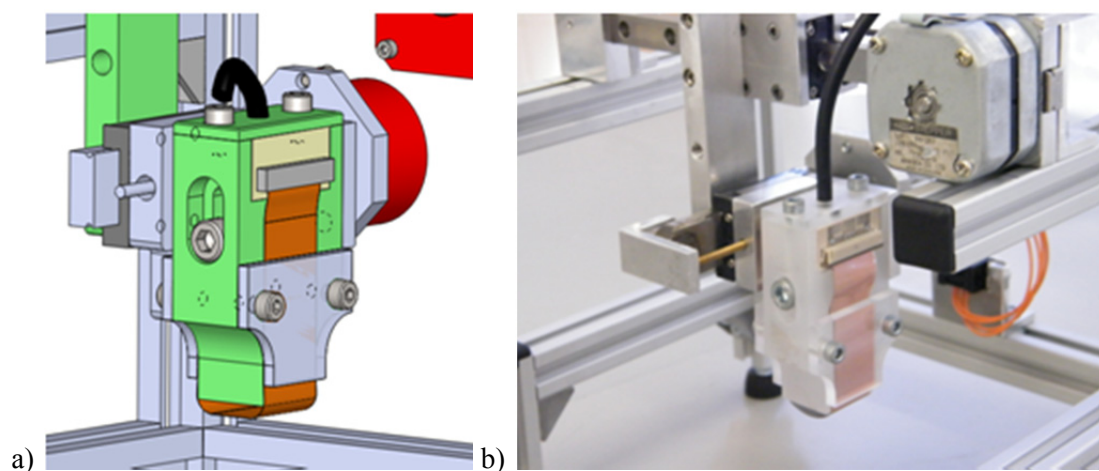


Figura 5.8 - a) Representação esquemática em desenho 3D da sonda em substrato de Kapton acoplada á mesa. b) Foto da sonda em substrato Kapton acoplada a mesa XY.

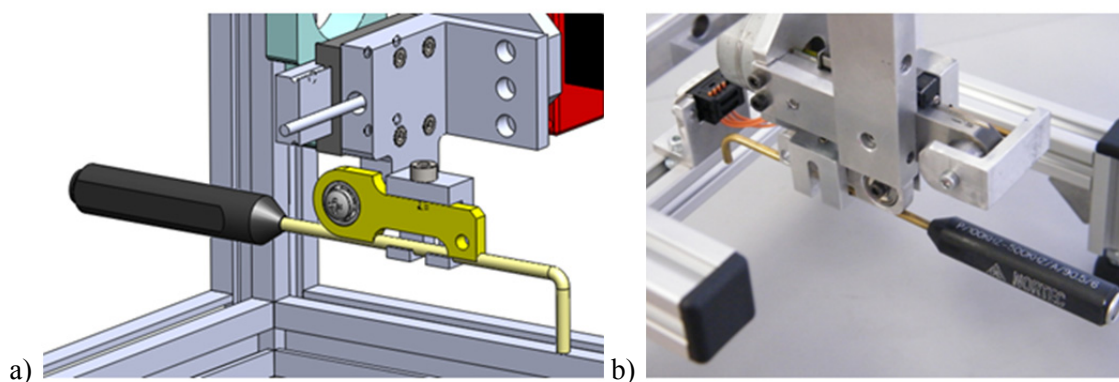


Figura 5.9 - a) Representação esquemática em desenho 3D da sonda *Pencil Probe* acoplada á mesa. b) Foto da sonda *PencilProbe* acoplada a mesa XY.

Sem o eixo y acoplado ao sistema móvel principal da mesa, as sondas que a ela forem acopladas, só terão movimento segundo x, ou seja, só poderá realizar inspecções ao longo de uma direcção, contudo uma vez mais irá ter a possibilidade de acoplar diferentes sondas como se mostra no esquema da Figura 5.6. Assim retirando o eixo y ao sistema, pode-se acoplar as sondas descritas nos pontos (1), (2) e (3) ao sistema móvel principal da mesa x, tendo assim mais 3 configurações possíveis, (4), (5) e (6).

Olhando agora para os pés da mesa, percebe-se que estes também podem ser alterados, conferindo à mesa, mais 3 configurações possíveis (Figura 5.10).

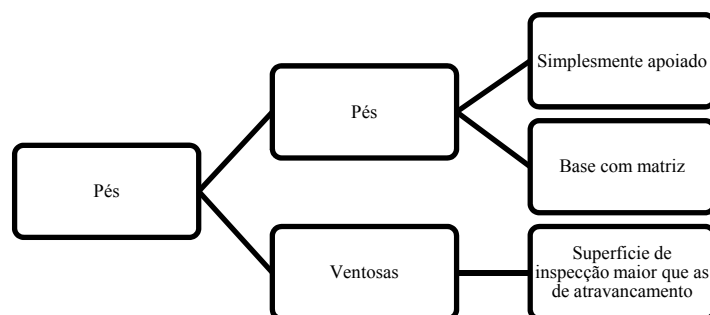


Figura 5.10 - Configurações dos pés da mesa.

Da Figura 5.11 percebe-se que a mesa se encontra simplesmente apoiada, podendo realizar inspecções de peças que estejam dentro das medidas de atravancamento da estrutura da mesa. As peças a inspeccionar podem ser colocadas sobre as laterais e na base da mesa. Se pretender inspeccionar uma peça com dimensões inferiores, pode-se acoplar aos pés da mesa uma base que contem uma matriz de furos que permite apoiar a peça e segurá-la (Figura 5.12). Neste tipo de análise é comum existirem peças para inspeccionar com cotas muito superiores às dimensões da mesa, para se poder realizar esta inspecção, os pés rígidos da mesa são trocados por ventosas e a base de trabalho da mesa XY passa a ser a própria peça como se mostra na Figura 5.13. Na Figura 5.13 a) mostra-se uma representação esquemática em 3D das ventosas incorporadas na mesa, apresentado apenas os quatro pés da mesa, já na Figura 5.13 b), a foto apresenta a mesa numa situação de inspecção, onde a área de inspecção é maior que as cotas de atravancamento da mesa, uma característica importante é a possibilidade de se realizar inspecções no plano vertical como mostrado na Figura 5.13 b).

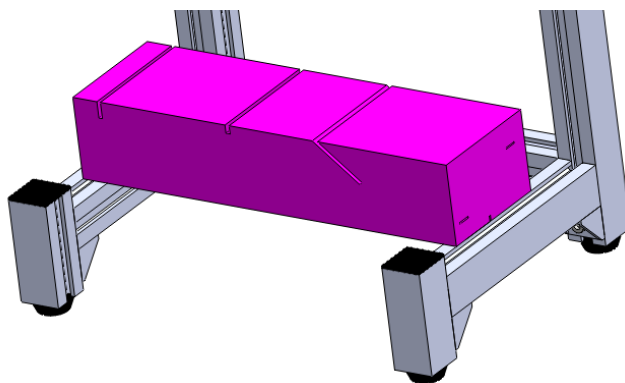


Figura 5.11 - Estrutura base da mesa, com os pés simplesmente apoiados.

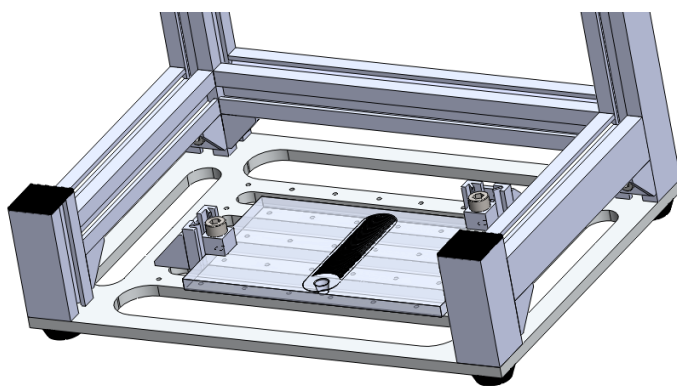


Figura 5.12 - Estrutura base da mesa, com matriz acoplada aos pés.

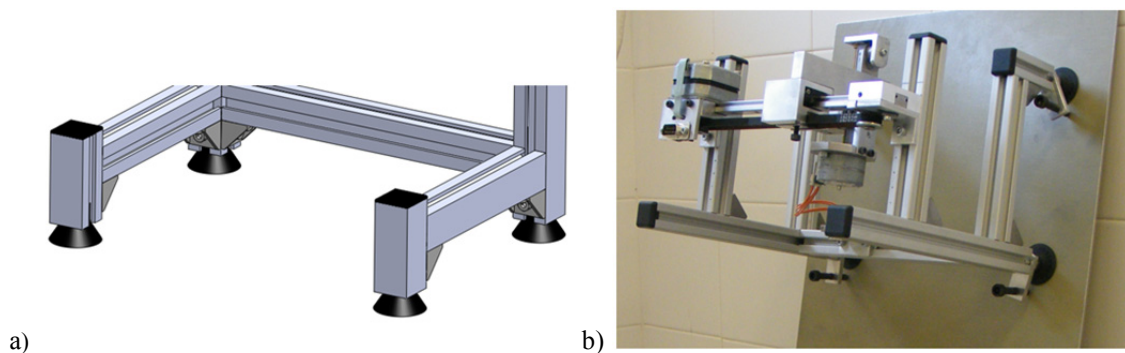


Figura 5.13 - Estrutura base da mesa com ventosas no lugar dos pés rígidos.

a) Representação esquemática dos quatro pés com ventosas incorporadas. b) Foto da mesa com as ventosas montadas no lugar dos pés rígidos, numa situação de inspecção no plano vertical.

A criação desta mesa apresenta-se não só como uma solução do problema levantado no decorrer deste trabalho, mas também como uma mais-valia para o Laboratório de Tecnologia Industrial (LTI) do DEMI, na medida em que constitui um importante reforço dos meios laboratoriais para as actividades pedagógicas e de investigação.

Sendo assim passa a ser possível realizar END no Laboratório de Tecnologia Industrial (LTI) do DEMI, numa mesa que apresenta uma área útil de inspecção de 14300 mm<sup>2</sup>, com cotas de atravancamento de 140x175 mm, porem as peças a inspeccionar podem passar as cotas de atravancamento, se tal acontecer a mesa oferece uma solução adequada, pois tem a possibilidade de substituir os pés rígidos por ventosas, podendo assim acoplar-se a própria peça que está em inspecção, como demonstrado em cima.

A mesa que se representa na Figura 5.14 foi desenvolvida no LTI do DEMI, e o movimento segundo X e Y é assegurado por dois motores passo a passo da marca NMB, com 400 passos. No eixo X o motor acciona uma correia que permite ao carro do barramento deslocar-se linearmente 112 mm, com uma resolução de 100 µm (Figura 5.15). No eixo Y, o motor acciona um veio roscado M3 com passo 0.5 mm, o que permite um deslocamento linear de 30 mm com uma resolução de 2.5 µm (Figura 5.16), todas as características importantes da mesa estão descritas pormenorizadamente na Tabela 5.2.

Com a excepção dos perfis base da mesa, dos barramentos e dos motores, todos os outros componentes foram idealizadas e concebidas no LTI do DEMI, os desenhos técnicos de produção encontram-se no Anexo A3 com as especificações necessárias para se poder realizar uma réplica da mesa.

Tabela 5.2 – Características da mesa XY desenvolvida

Dimensões gerais da mesa XY (mm) (Cotas de atravancamento)	X	220
	Y	160
	Z	210
Curso de Inspeção automático (mm)	X	112
	Y	30
Curso de Inspeção manual (mm)	X	112
	Y	97
	Z	130
Área de Inspeção (mm <sup>2</sup> )	Máx.	112x30 = 3360
Características dos eixos	X	Maior velocidade Não auto-bloqueado (correia)
	Y	Maior precisão Auto-bloqueado (sem fim)
	Z	Posicionamento manual
Resolução dos eixos (µm)	X	100
	Y	2,5
Velocidade de inspecção (mm/s)		506,3
Peso da mesa (Kg)		1.5

A velocidade de inspecção linear foi obtida através da resolução do eixo X e da velocidade média de inspecção por passo, valor este que é na ordem do 11.85 ms/passo. Sabendo-se a resolução em X e a velocidade de inspecção em ms/passo, procedeu-se a uma



conversão de unidades simples, multiplicou-se o valor de 100  $\mu\text{m}$  por 60 seg. e dividiu-se pela velocidade de inspecção (11,85 ms/passo).

O valor de resolução para o eixo X foi obtido através do cálculo do perímetro do pinhão do motor e o seu número de passos. O perímetro do pinhão do motor é de 37.7 mm, este valor sobre os 400 passos, mostra o valor da resolução do eixo X (100  $\mu\text{m}$ ). A resolução do eixo Y foi obtida através do passo da rosca do veio, sabe-se que este é de 0.5 mm e que o motor tem 200 passos, assim sendo se dividir o valor do passo de rosca pelo número de passos, tenho a resolução do eixo expressa em mm.

Na Figura 5.17 mostra-se a mesa XY desenvolvida, sobre uma folha A4 com o objectivo de se ter um factor de escala, que permite perceber e interpretar melhor as dimensões da mesa descritas na Tabela 5.2.

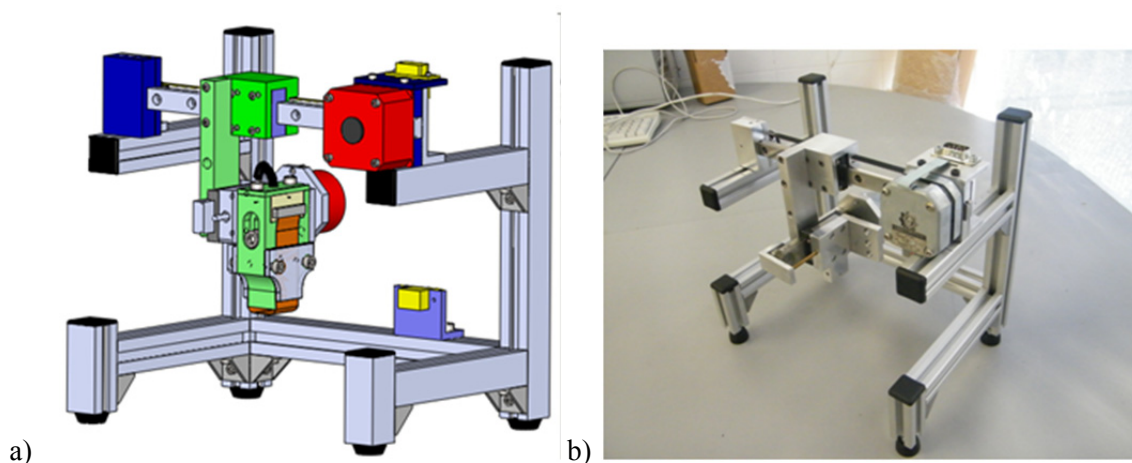


Figura 5.14 - a) Representação esquemática em desenho 3D da mesa na sua configuração mais completa (eixo X e Y). b) Réplica da mesa desenvolvida em Solidworks.

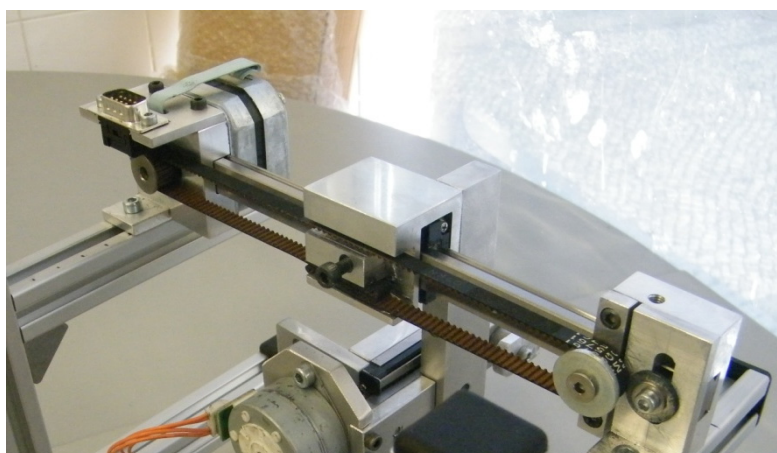


Figura 5.15 - Vista traseira da mesa.  
a) Motor passo a passo, b) correia



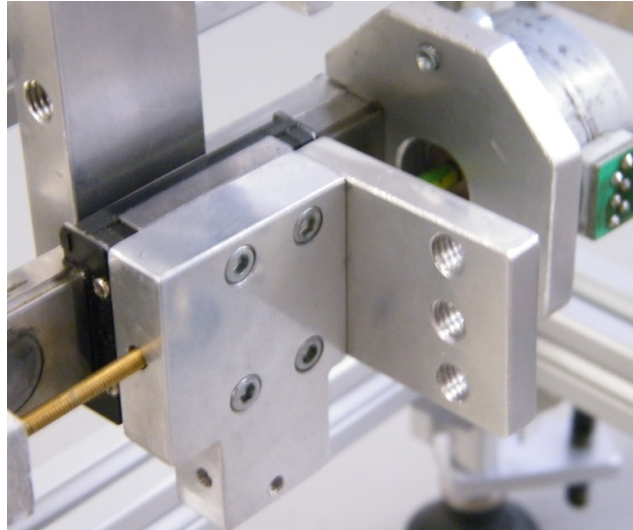


Figura 5.16 - Eixo Y da mesa.  
a) Motor passo a passo, b) veio roscado M3.

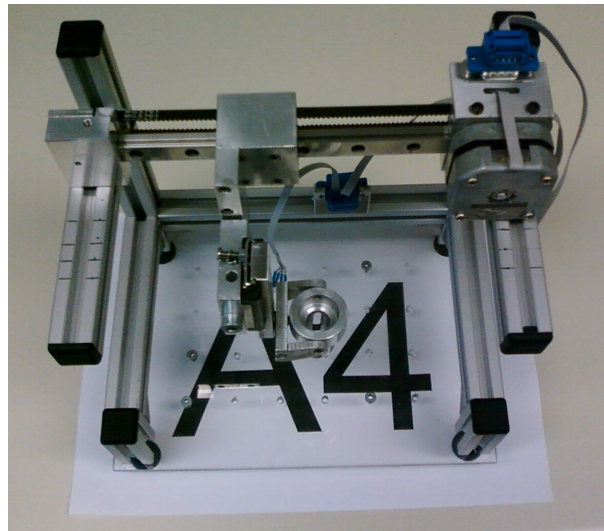


Figura 5.17 – Representação da mesa XY sobre uma folha A4 para ter um factor de escala, que permite perceber as dimensões da mesa.

## 5.6 - Dispositivos electrónicos

A sonda IOnic contém um único filamento de excitação plano, o que implica injectar uma corrente com uma amplitude muito superior para se obter o mesmo campo magnético que se obteria usando uma bobina de excitação toroidal, na qual o campo magnético resultante é a soma das contribuições de cada espira. Por este motivo é necessário um amplificador operacional para injectar no filamento de excitação uma intensidade de corrente na ordem de 1 A, a fim de obter um campo magnético primário  $H_p$  suficientemente intenso que permita gerar o campo de força eletromotriz adequado. Esta corrente tem que ser sempre constante numa largura de banda de  $\sim 10$  KHz a  $\sim 1$  MHz, este aspecto é difícil do ponto de vista tecnológico,

nomeadamente porque surge ruído e fenómenos de *slew rate* <sup>11</sup>. Outro aspecto da fiabilidade deste dispositivo electrónico está relacionado com a precisão e exactidão com que são calculados os valores de amplitude e diferença de fase da tensão induzida  $U_{out}$  aos terminais das bobinas sensíveis da sonda. Este sistema foi utilizado numa primeira fase para realizar estudos de condutividade eléctrica de diferentes materiais, bem como realizar pequenas inspecções em defeitos criados por eletroerosão, paralelos e perpendiculares a superfície de inspecção.

No âmbito deste trabalho foi utilizado um dispositivo electrónico desenvolvido no IST pelo Engenheiro Luís Rosado, que permite extrair a máxima performance da sonda IOnic [23]. Este sistema possui um núcleo de processamento baseado num dispositivo de lógica programável permitindo a geração e análise dos sinais na sonda, através de múltiplos algoritmos de processamento digital de sinal. A comunicação com computadores pessoais é assegurada pelas interfaces Ethernet 10/100 e USB 2.0 *High Speed*. A arquitectura do sistema proposto permite a configuração de múltiplas combinações de periféricos para a geração e aquisição dos sinais na sonda. A aquisição de sinais é garantida por um amplificador de ganho programável e um conversor analógico-digital enquanto a geração de sinais é conseguida através de um conversor digital-analógico e um amplificador de transcondutância com elevada corrente de saída. Em conjunto, os dois periféricos mostram-se adequados para operar a sonda na gama de frequências desde os 10 KHz até aos 10 MHz. Este novo dispositivo é concebido em PCB e foi denominado por ECScan, este é composto pela placa principal que decompõe em duas placas de PCB que são ligadas lado a lado e tem uma dimensão total de 220x180 mm, como esquematiza a Figura 5.18.

Além da placa principal foi desenvolvido em simultâneo a placa aquisição de dados, a de movimentação dos motores passo a passo da mesa, bem como a de excitação da sonda, estas três placas estão esquematizadas na Figura 5.19, onde a Figura 5.19 a), b) e c) corresponde a placa de excitação da sonda IOnic, a placa de aquisição, e a placa que permite movimentar a sonda, respectivamente.

Este sistema permitiu realizar a inspecção das seis sondas projectadas, e testa-las num defeito idêntico ao defeito criado no *Software* de simulação numérica. O objectivo deste ensaio foi o de chegar aos mesmos resultados apresentados na componente de simulação numérica. Utilizou-se este sistema nesta inspecção pois é um sistema que garante uma qualidade melhor na análise dos resultados.

---

<sup>11</sup> *velocidade de varrimento* em Português, define-se como a velocidade de resposta do amplificador instrumental a uma variação de tensão na entrada, este valor na teoria deveria ser infinito, o que na realidade não acontece. Logo conclui-se que quanto maior for o valor deste parâmetro melhor será o amplificador instrumental

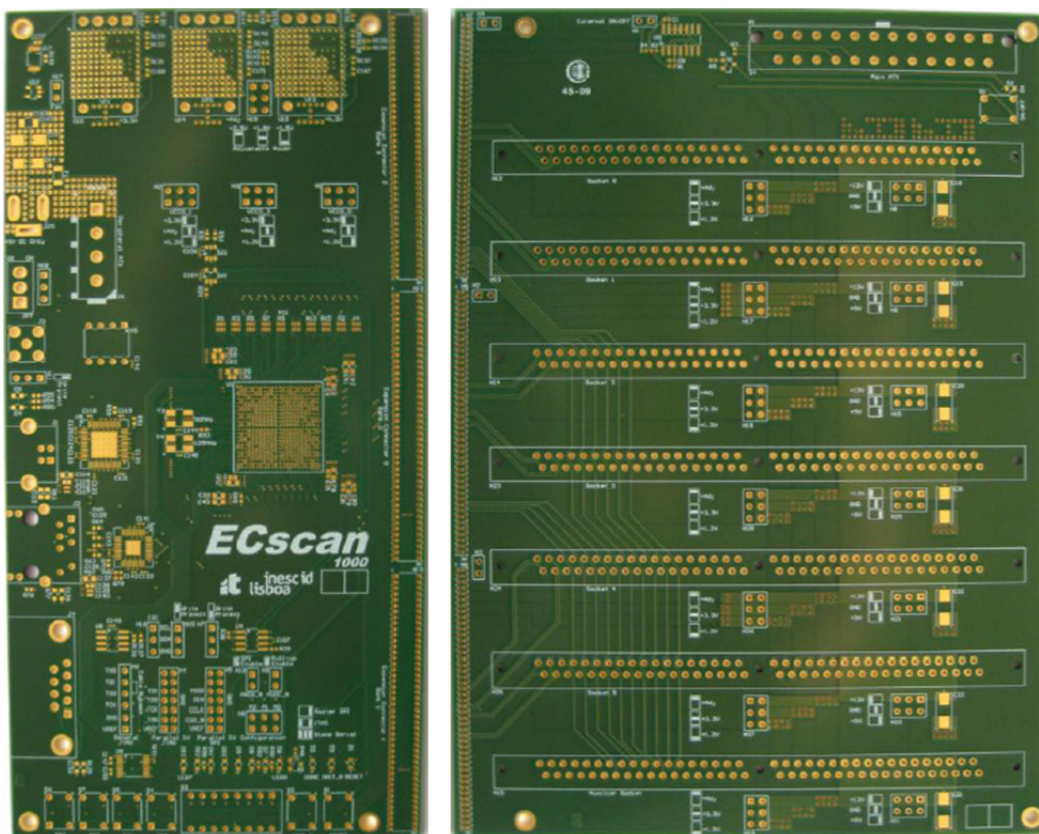


Figura 5.18 - Placa Principal em PCB do dispositivo eléctrico (ECscan).

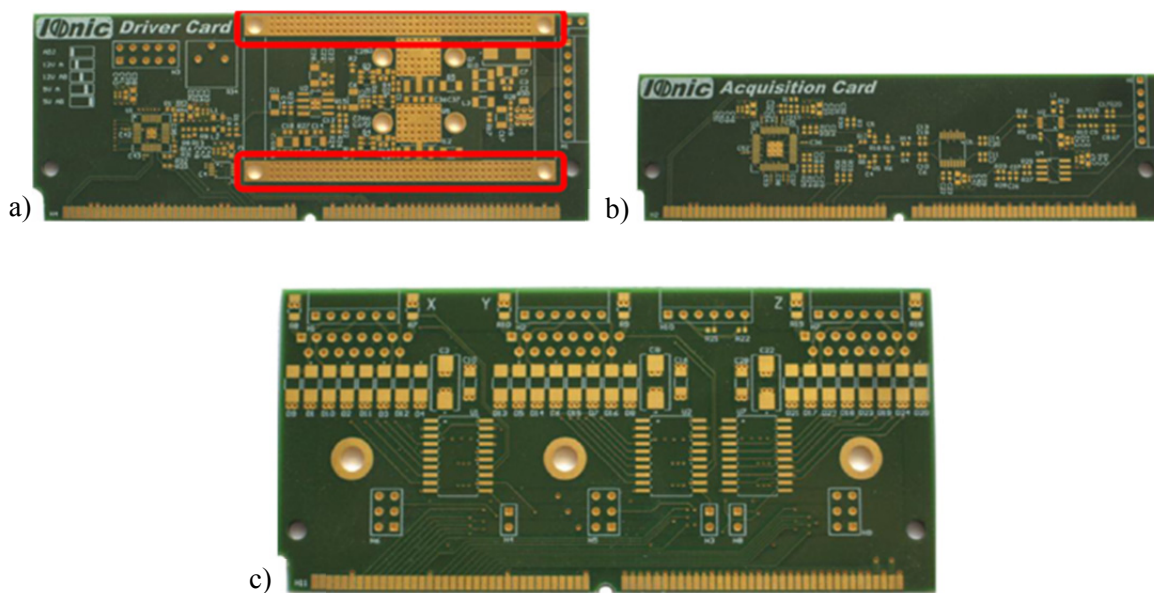


Figura 5.19 - a) Placa de excitação da sonda IONic em PCB com dimensões 108x40 mm. b) Placa de aquisição de dados da sonda IONic em PCB com dimensões 108x30 mm. c) Placa de movimentação da sonda IONic em PCB com as dimensões 108x50 mm.

## 5.7 - Software de END dedicado (LabVIEW)

A coordenação de todos os elementos do sistema de END por CI descritos nos pontos anteriores, é realizada por um *Software* anteriormente desenvolvido para esse efeito [24]. O *Software* foi desenvolvido em linguagem G, no ambiente LabVIEW 8.0 da *National Instruments*, pelo seu elevado potencial na realização de aquisição, processamento e análise de dados em tempo real, assim como na criação de (GUI). O programa é composto por 8 sub-Vis e uma interface gráfica de controlo do sistema de END. No Anexo A4 representa-se um excerto do código desenvolvido. Na Figura 5.20 mostra-se a interface do *Software* desenvolvido onde é possível posicionar a sonda, definir a velocidade de deslocamento da sonda, realizar inspecções automáticas, gravar os dados e visualizar em tempo real o sinal da sonda nas componentes real e imaginária.

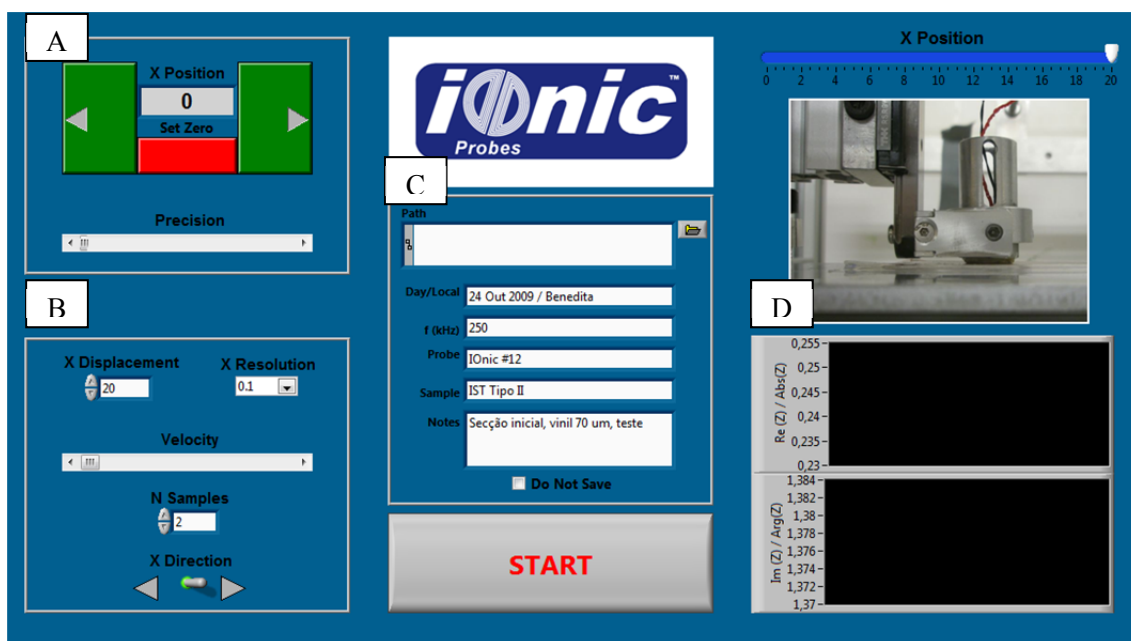


Figura 5.20 – Janela de inicialização do *Software*.

- A: Posicionamento e precisão de deslocamento das sondas, definição da origem do referencial
- B: Velocidade e direcção do deslocamento das sondas, definição do deslocamento em X e a sua resolução
- C: Definição do método de medição e de excitação das sondas e da frequência.
- D: Visualização em tempo real dos dados adquiridos em gráficos de componentes real e imaginária

Assim como a componente electrónica apresenta dois dispositivos distintos, também o *Software* que opera toda a parte da locomoção aquisição de dados, apresenta duas interfaces distintas. Para a aquisição de dados com a primeira componente electrónica descrita anteriormente, utiliza-se a interface apresentada na Figura 5.20. Na Figura 5.21 representa-se a

interface do *Software* que permite controlar o novo dispositivo electrónico do IST desenvolvido pelo Engenheiro Luís Rosado.

A janela do *Software* representado na Figura 5.21 foi utilizado para adquirir os dados de inspecção das cinco sondas produzidas em PCB, nela pode-se definir a sonda com que se vai realizar a inspecção, a frequência, o ganho, a amplitude, o deslocamento segundo o eixo X e Y, e os dados gráficos do sinal da sonda em tempo real.

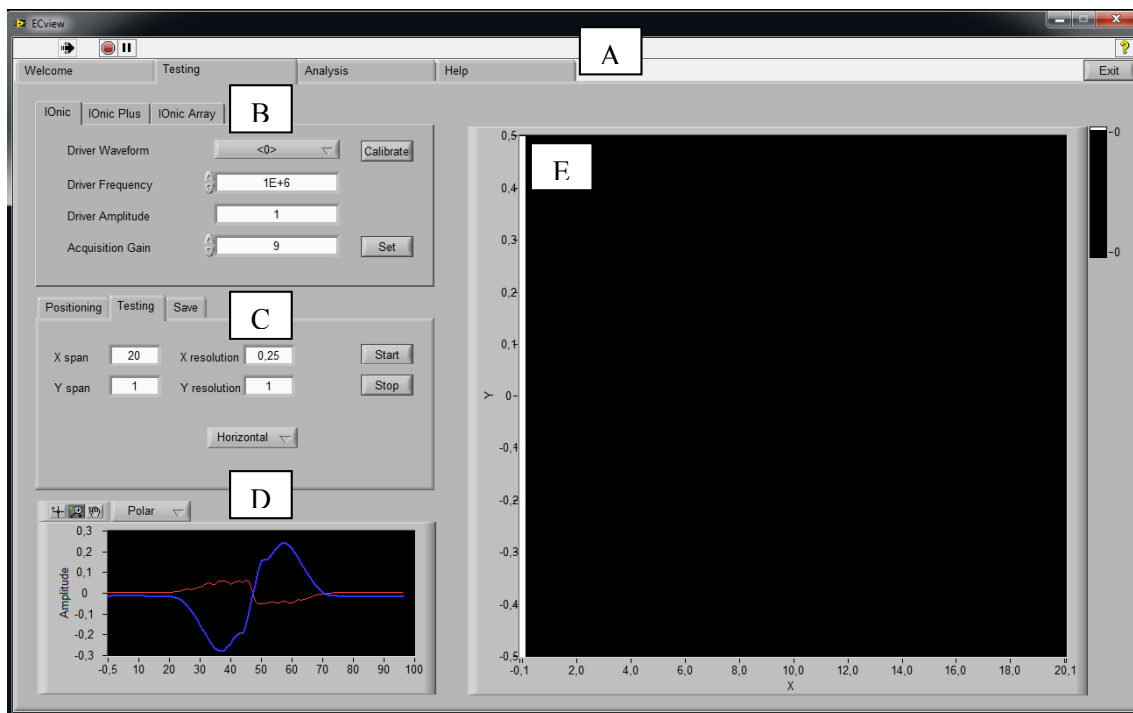


Figura 5.21 - Janela de inspecção automática.

A: quatro menus do *Software* composto por janelas de início, teste, análise e ajuda

B: Escolha da sonda em teste, da frequência, da amplitude e do ganho da sonda

C: Definição do deslocamento de X e Y, a sua resolução para realizar a inspecção automática

D: Visualização em tempo real dos dados adquiridos em gráfico com parte real e imaginária

E: Visualização em tempo real dos dados adquiridos em gráfico para as inspecções nos dois eixos

## 5.8 - Síntese do capítulo

Neste capítulo foi apresentada a forma com se desenvolveu as sondas em PCB, especificando um pouco a funcionalidade e a potencialidade do *Software Altium Designer 2009*, bem como a caracterização de uma sonda em PCB. Este desenvolvimento foi levado a cabo depois de uma análise aos resultados experimentais apresentados nos capítulos 3 e 4.

Os desenvolvimentos tecnológicos, são parte importante deste capítulo, e foram apresentados como uma solução na inspecção de novos materiais e novas tecnologias de produção que têm conduzido ao aparecimento de defeitos cuja especificidade morfológica é significativamente diferente dos defeitos característicos dos materiais convencionais, processados por tecnologias de produção convencionais. Também estes desenvolvimentos estão focados na análise efectuada aos resultados apresentados nos capítulos 3 e 4.

Foram desenvolvidos e descritos os meios externos adequados para o funcionamento das sondas, nomeadamente: i) os meios de posicionamento e locomoção automatizada das trajectórias de inspecção; ii) os equipamentos de geração, aquisição e processamento de sinal; iii) o *Software* dedicado para coordenar todos os elementos do sistema.



## **6 - VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE END POR CORRENTES INDUZIDAS**

### **6.1 - Introdução**

O objectivo do trabalho apresentado neste capítulo é validar experimentalmente as seis sondas apresentadas na Figura 5.5 em § 5.4, e com esse estudo perceber se as simulações numéricas realizadas no *Software CST studio suite* são uma boa ferramenta para futuros testes em diferentes configurações de sonda.

Em § 6.2 descreve-se a aplicação do sistema à inspecção de defeitos padrão com as seis sondas produzidas em PCB. Os ensaios realizados permitem perceber que as curvas do sinal das sondas simuladas numericamente, são idênticas as obtidas experimentalmente.



## 6.2 - Aplicação a Condições de Defeitos Padrão

### 6.2.1 - Caracterização da Aplicação

A aplicabilidade do novo sistema de END as novas sondas IOnic foi caracterizado em condições de defeito padrão. Para esse efeito utilizou-se um bloco de alumínio contendo um conjunto de defeitos padrão diversificados. Os defeitos contidos no bloco foram produzidos pelo processo de electroerosão, apresentando 300  $\mu\text{m}$  de espessura, e uma profundidade variável (Figura 6.1). Para o presente estudo utilizou-se o defeito padrão com a profundidade de 20 mm.

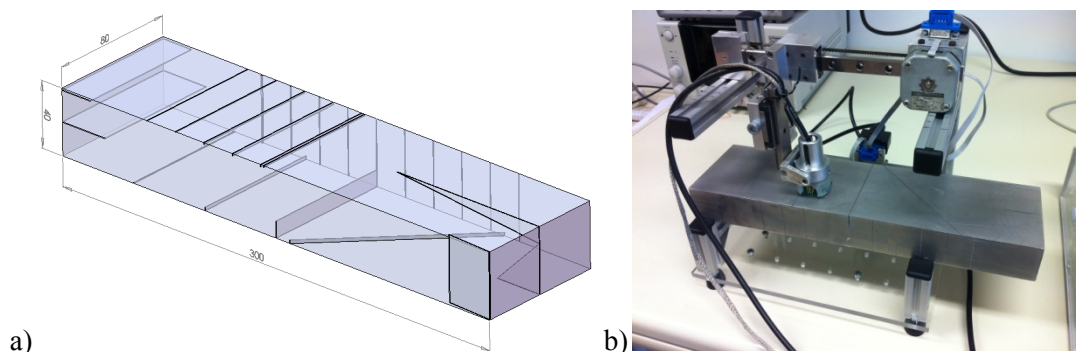


Figura 6.1 - Padrão em alumínio contendo um conjunto de defeitos diversificados, produzidos por electroerosão.

a) Vista semitransparente da localização dos vários defeitos paralelos à superfície, perpendiculares à superfície e defeitos em rampa [3], b) Padrão (300x80x40 mm) com sistema de locomoção da sonda IOnic.

Os ensaios consistiram em deslocar a sonda perpendicularmente ao defeito padrão, com o eixo de simetria da sonda paralelo ao rasgo do defeito padrão. Foram feitos varrimentos lineares com comprimentos de 20 mm, garantindo 10 mm para cada lado do defeito padrão, e com um espaçamento entre aquisições de  $\Delta X = 250 \mu\text{m}$ . Em todos os ensaios realizados, o avanço da sonda corresponde às coordenadas positivas do eixo dos XX. A sonda foi revestida por uma película de papel de vinil autocolante com 100  $\mu\text{m}$  de espessura, com o objectivo de proteger e isolar electricamente as espiras das bobinas sensíveis. Este procedimento visou comprovar os resultados das simulações numéricas.

Na Figura 6.2 representa-se o procedimento de inspecção do defeito padrão, utilizando-se o sistema de END desenvolvido.

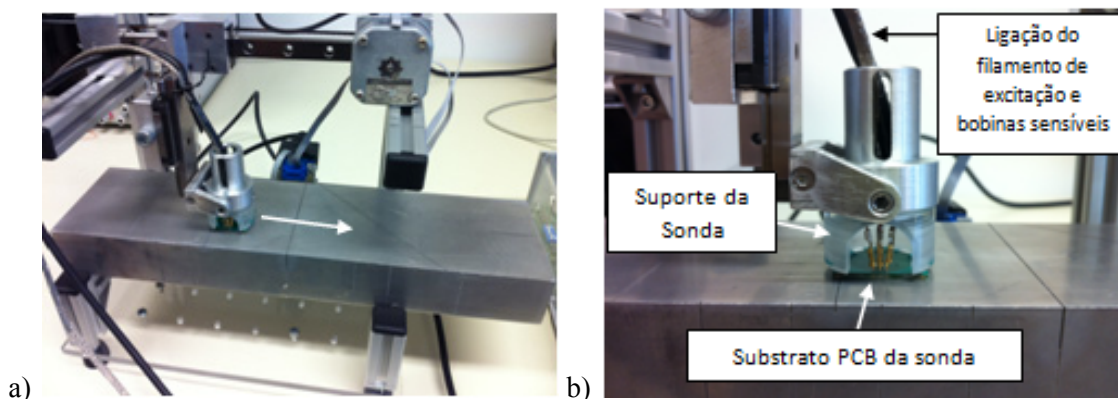


Figura 6.2 - Procedimento de inspecção do defeito padrão com o sistema de END desenvolvido  
a) Sentido do deslocamento da sonda sobre o defeito padrão, b) Pormenor do calço da sonda sobre o material.

Para a se realizar a inspecção, foi criado um suporte (Figura 6.3) para cada uma das sondas em polimetil-metacrilato (PMMA) que lhes confere uma maior resistência e ao mesmo tempo não causa interferências no sinal promovido pela sonda, está foi uma solução expedita de se acomodar as sondas que permitiu realizar as ligações ao sistema electrónico sem que este tivesse influência nos resultados finais.

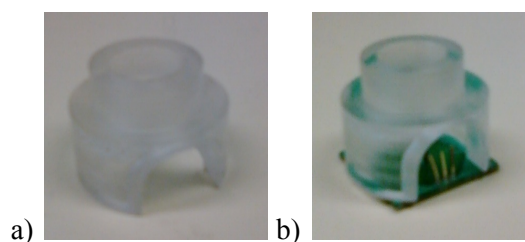


Figura 6.3 – Suporte das sondas em PMMA.  
a) suporte onde se mostra as cavidades de passagem dos fios de ligação para as bobinas sensíveis e para o filamento de excitação. b) Suporte com a sonda acoplada.

No tratamento dos dados experimentais, percebeu-se que a aquisição de sinal e o canal de excitação, ambos provocam uma alteração na fase, assim sendo para se poder realizar uma comparação mais correcta de resultados, efectuou-se uma rotação no plano complexo, como o objectivo de captar toda a informação dos dois eixos e condensou-se toda essa informação em apenas um dos eixos.

### 6.2.2 - Resultados

Os principais resultados da inspecção do defeito padrão, para a sonda # 2 estão representados na Figura 6.4. Nestas figuras encontram-se respectivamente os gráficos do sinal da sonda IOnic # 2 para as frequências de 100 KHz e 1000 KHz. A curva a azul corresponde a um varrimento transversal sobre o defeito padrão, a curva representada por linha e ponto a negro corresponde ao sinal da sonda obtido numericamente, conforme já foi descrito em § 4.10 e a curva a cheio representada a negro descreve a simulação numérica ajustada, isto é, a simulação numérica real multiplicada por um factor que permite aproximar as curvas experimentais as curvas numéricas, os factores encontram-se descritos nas legendas das figuras respectivas e encontram-se compreendidos entre os valores de 1.1 a 3.2. Estes resultados permitem confirmar que o sinal numérico aproxima com elevado rigor o resultado experimental, o que valida ambos os resultados, esta é a primeira e mais importante conclusão que sobressai da análise gráfica.

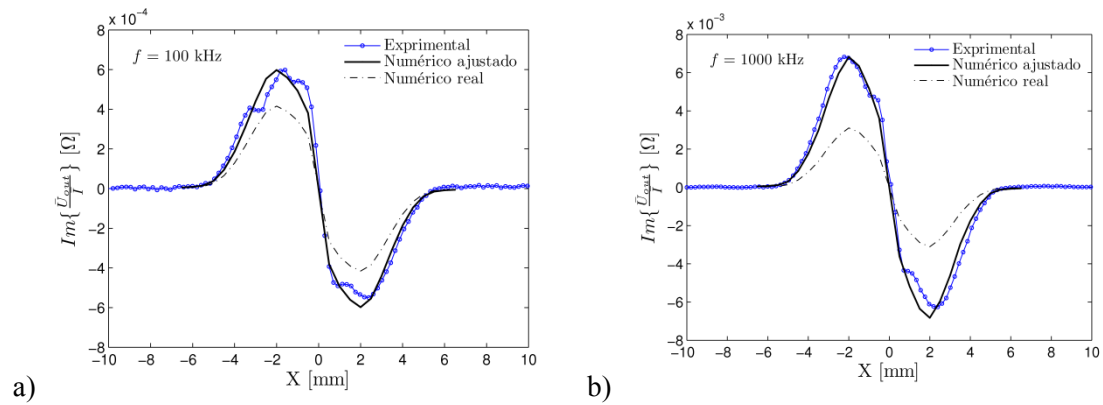


Figura 6.4 – Resultados experimentais e numéricos do sinal da sonda #2, apresenta-se três sinais, são eles: experimental; numérico ajustável e numérico real.

- Sinal da sonda #2 para uma frequência de 100 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 1.44.
- Sinal da sonda #2 para uma frequência de 1000 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 2.19.

Da análise quantitativa dos gráficos apresentados na Figura 6.4 percebe-se que as curvas iniciam a sinusóide no mesmo ponto, mas a curva dos ensaios experimentais abrange uma maior área. Qualitativamente os gráficos mostram que a amplitude da simulação numérica real é aproximadamente metade da descrita pela curva da simulação numérica ajustada, este facto deve-se as simulações numéricas serem uma aproximação matemática à realidade.

As restantes quatro sondas apresentam resultados idênticos e conclusões semelhantes aos descritos na análise dos gráficos da Figura 6.4.

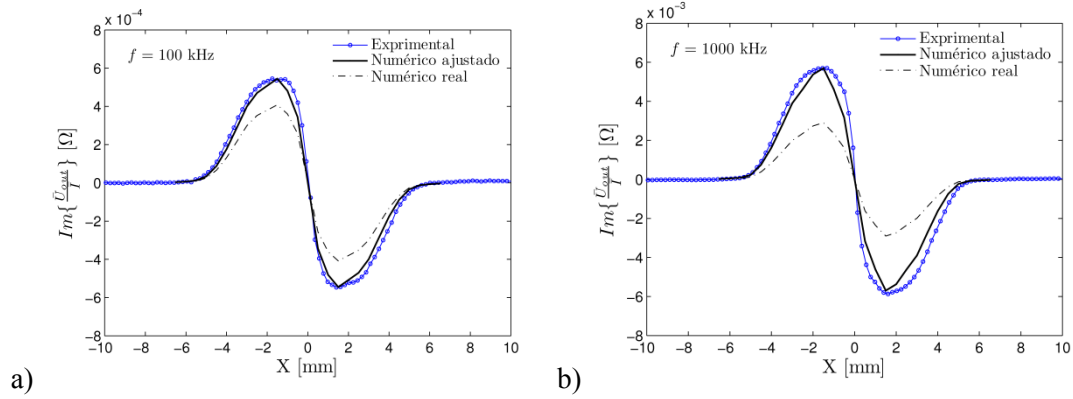


Figura 6.5 – Resultados experimentais e numéricos do sinal da sonda #3, apresenta-se três sinais de sonda, são eles: experimental; numérico ajustável e numérico real.

- a) Sinal da sonda #3 para uma frequência de 100 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 1.34
- b) Sinal da sonda #3 para uma frequência de 1000 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 1.96.

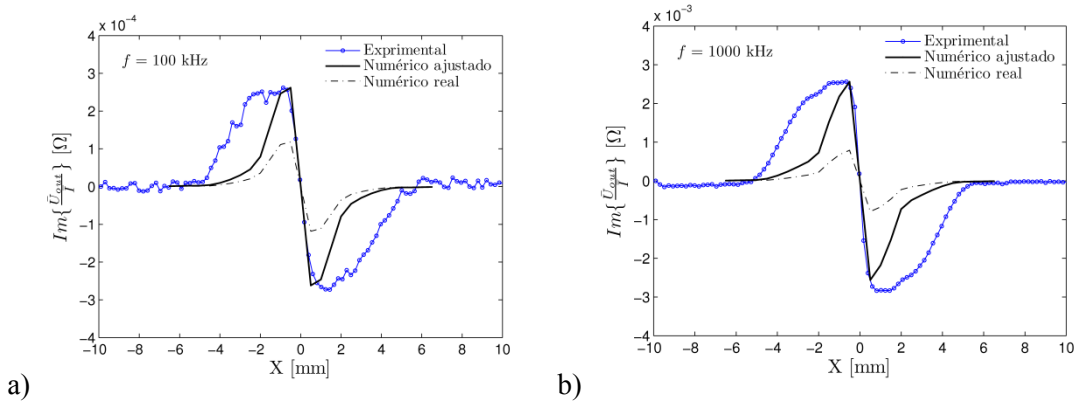


Figura 6.6 - Resultados experimentais e numéricos do sinal da sonda #6, apresenta-se três sinais de sonda, são eles: experimental; numérico ajustável e numérico real.

- a) Sinal da sonda #6 para uma frequência de 100 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 2.21.
- b) Sinal da sonda #6 para uma frequência de 1000 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 3.24

Os gráficos apresentados na Figura 6.6 mostram uma discrepância do sinal numérico para o sinal experimental, este factor permite confirmar que o sinal numérico não aproxima com elevado rigor o resultado experimental, assim sendo, a validade de ambos os resultados não se encontra corroborada.

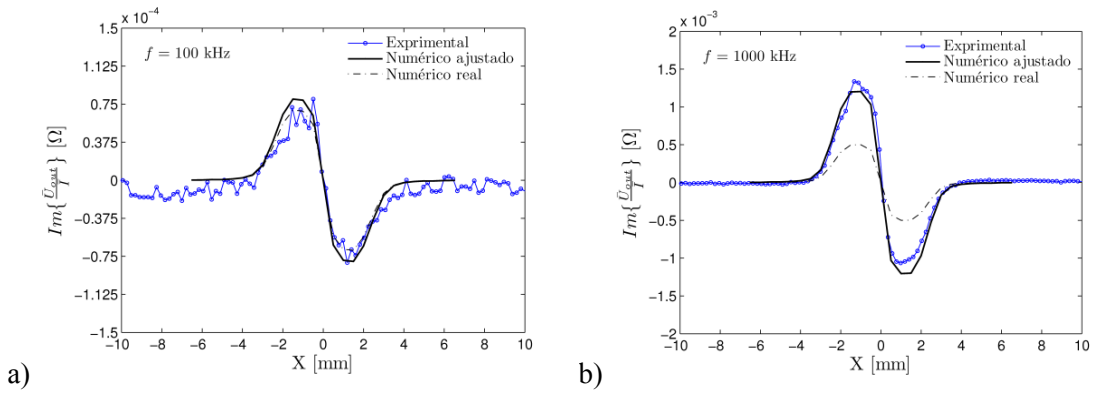


Figura 6.7 - Resultados experimentais e numéricos do sinal da sonda #9, apresenta-se três sinais de sonda, são eles: experimental; numérico ajustável e numérico real.

- a) Sinal da sonda #9 para uma frequência de 100 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 1.16.
- b) Sinal da sonda #9 para uma frequência de 1000 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 2.68

O sinal da sonda #9 para uma frequência de 100 KHz, apresenta uma perturbação (Figura 6.7 (a)), esta perturbação de sinal é dividida ao facto de a sonda ter um valor próximo da ordem de grandeza do valor da frequência. Este fenómeno verifica-se nesta configuração de sonda porque o diâmetro das bobinas sensíveis é de 6 mm e o sinal está confinado numa área mais pequena. Para uma frequência de 1000 KHz o fenómeno de perturbação do sinal da sonda já não se verifica (Figura 6.7 (b)).

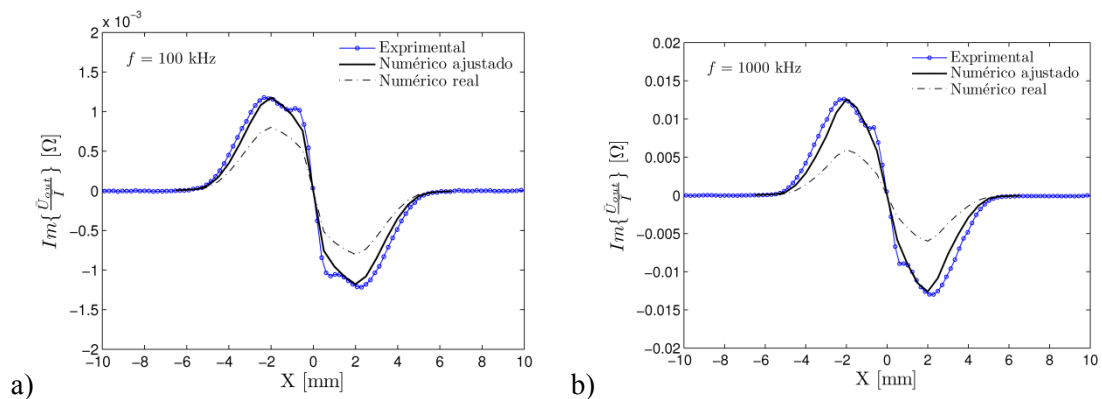


Figura 6.8 - Resultados experimentais e numéricos do sinal da sonda #11, apresenta-se três sinais de sonda, são eles: experimental; numérico ajustável e numérico real.

- a) Sinal da sonda #9 para uma frequência de 100 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 1.47.
- b) Sinal da sonda #9 para uma frequência de 1000 KHz para as componentes experimentais, numérica ajustada e real, com um factor de 2.10.

### **6.3 - Síntese do Capítulo**

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados da aplicação e da validação do sistema de END por CI. Escolheu-se um defeito padrão idêntico ao avaliado numericamente, com o intuito de validar os resultados experimentais.

Os ensaios realizados em condições de defeito padrão revelaram que os resultados apresentados pelos sinais das sondas permitem confirmar que a simulação numérica aproxima com elevado rigor os resultados experimentais, de onde se pode concluir que ambos os resultados estão validados.



## **7 - CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

### **7.1 - Introdução**

No presente capítulo evidenciam-se as conclusões relativas ao trabalho realizado, e destacam-se propostas para desenvolvimentos futuros.

Em cada capítulo relatado na presente tese, os aspectos mais relevantes e conclusões a retirar foram sintetizadas no final dos mesmos, pelo que as conclusões apresentadas no presente capítulo são as que se consideram de carácter mais abrangente. É no entanto de salientar que as conclusões cruciais retiradas do presente trabalho foram apontadas nos comentários aos resultados obtidos (no capítulo 6).

No que diz respeito a desenvolvimentos futuros, acredita-se que estes passem pelo desenvolvimento das novas sondas e pelo aprofundamento do conhecimento da influência de cada parâmetro de modo a que estas novas sondas e este novo sistema de END, se possam tornar uma realidade no ambiente industrial.



## 7.2 - Conclusões

A modelação numérica das correntes induzidas com o *Software* CST STUDIO revelou-se uma ferramenta expedita para avaliar as diferentes geometrias da sonda IOnic e um método eficaz para compreensão e previsão de resultados. Os resultados da validação experimental mostraram-se concordantes com os resultados da simulação numérica, quer em termos qualitativos, quer em termos quantitativos.

A simulação numérica permitiu também clarificar alguns resultados inerentes ao próprio modelo de elementos finitos usado. Nomeadamente, foi possível comprovar que os resultados não são alterados com as dimensões dos materiais que constituem o modelo (ar e alumínio), já que a condição fronteira no limite dos materiais é a de material semi-infinito. Por outro lado, verificou-se que a largura do defeito artificial é um parâmetro crítico.

A simulação numérica permitiu ainda comprovar alguns fenómenos relacionados com o princípio de funcionamento da sonda: foi possível analisar o efeito do aumento da frequência de inspecção, tendo-se confirmado que este provoca um aumento da intensidade do sinal, de forma mais preponderante na componente imaginária da impedância eléctrica. O efeito do *lift-off* foi também modelado e interpretado com sucesso.

Dos 6 parâmetros geométricos considerados os que têm maior influência no sinal da sonda IOnic são:

- i) A espessura e espaçamento das espiras sensíveis (B1): de facto, tal como previsto, quanto menor for a espessura e o espaçamento das espiras, maior será a área das bobinas sensíveis, e consequentemente maior será o fluxo de campo magnético atravessado por elas, o que resulta numa maior intensidade do sinal recebido.
- ii) A posição do filamento de excitação em Z (E3): também como previsto, a proximidade do filamento de excitação à superfície a inspeccionar, aumenta a intensidade das CI no material, melhorando o comportamento da sonda. Esta solução é relativamente fácil de implementar com substratos multi-camada. Contudo é conveniente não colocar o filamento de excitação no mesmo plano das bobinas sensíveis, para permitir a aproximação entre elas. Assim é conveniente, por exemplo, elevar o filamento de excitação 200  $\mu\text{m}$  do plano das bobinas sensíveis.
- iii) O comprimento do filamento de excitação (E1): este talvez tenha sido o resultado mais surpreendente, na medida em que se concluiu que um filamento de excitação com um comprimento igual a metade do diâmetro das bobinas sensíveis produz um resultado apenas ligeiramente pior do que o de uma sonda com o comprimento igual ao diâmetro

das bobinas sensíveis. Por outro lado, verificou-se numericamente que um comprimento do filamento de excitação duas vezes superior ao diâmetro das bobinas sensíveis produz um sinal com uma intensidade menor (cerca de metade), mas com maior resolução espacial (cerca do dobro). Este comportamento não foi verificado experimentalmente, por razões ainda não esclarecidas. No entanto este resultado deve ser aprofundado uma vez que poderá ter um elevado potencial para futuras configurações da sonda IOnic.

O parâmetro espessura do filamento de excitação (E2) demonstrou não tem qualquer influência no sinal da sonda. Este resultado pode ser compreendido, tendo em consideração o seguinte facto: apesar da densidade de corrente que circula no filamento ser menor, a corrente total é a mesma, e consequentemente, a energia transferida para o material também será a mesma, estando igualmente confinada no mesmo comprimento central da sonda.

Das 12 configurações de sondas testadas numericamente a geometria óptima corresponde à sonda # 12, embora esta não tivesse sido validada experimentalmente. A sonda #12 apresenta as seguintes características:

Tabela 7.1 – Características Eléctricas e Físicas da Sonda #12

Sondas	Características Eléctricas		Características Físicas					
	Resistência eléctrica Filamento de excitação [Ω]	Resistência eléctrica das bobinas sensíveis [Ω]	Peso [g]	Espessura do cobre [μm]	Espessura do substrato [μm]	Dimensões [mm]	Espessura das pistas [μm]	Plano de massa [Ω]
#12	0.10	4.15	1.79	30	1600	240x240	100	0.10

Os meios de inspecção laboratoriais desenvolvidos mostraram-se adequados aos requisitos estabelecidos, nomeadamente no que diz respeito à versatilidade, portabilidade, precisão e rapidez da inspecção. O carácter económico da solução encontrada é outro factor relevante.

### **7.3 - Propostas Para Desenvolvidos Futuros**

Um aspecto importante nos desenvolvimentos futuros é a produção novamente da sonda #12 em PCB. O objectivo será validar os resultados numéricos que mostraram que a configuração da sonda #12 é uma das configurações com melhor comportamento.

Esclarecer a discrepância do sinal numérico e do sinal experimental da sonda #6, e realizar novos ensaios que permitam validar o sinal da sonda.

Criar uma nova sonda com os melhores parâmetros das quatro sondas descritas em § 4.10, ou seja, o comprimento do filamento de excitação com metade do tamanho do diâmetro das bobinas sensíveis, a espessura e o espaçamento das pistas das bobinas sensíveis com 50  $\mu\text{m}$ , o afastamento do filamento de excitação a 200  $\mu\text{m}$  do plano das bobinas sensíveis. Outro desenvolvimento e testes ainda estão por realizar nas variantes da sonda IOnic de configuração matricial e de substrato flexível.

Um desenvolvimento científico fundamental para a continuidade deste trabalho é a caracterização de defeitos padrão com outras morfologias, como por exemplo defeitos em rampa e defeitos paralelos ao plano de inspecção. Alargar o campo de inspecção a novos materiais e a defeitos promovidos por novas tecnologias de produção. Este desenvolvimento conduzirá ao conhecimento das potencialidades das seis sondas produzidas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Portuguese Patent PT N. ° 103854: New NDT eddy current *Probe*. Data of patent: 19/10/2007. Inventors: Telmo Santos and Pedro Vilaça. Assignee: IST. Current status: conceding.
- [2] Portuguese Patent PT N.º 104089: “A New NDT method based on eddy current *Probe* variant”. Date of patent: 09/06/2008. Inventors: Telmo Santos, Pedro Vilaça, Moisés Piedade. Assignee: IST; Current status: conceding;
- [3] Telmo Santos; “Ensaaios Não Destrutivos por Correntes Induzidas: Desenvolvimento e Aplicação à Soldadura por Fricção Linear” Tese de Doutoramento, IST, UTL, Lisboa, Julho de 2009.
- [4] Luís Rosado, Telmo G. Santos, Moisés Piedade, Pedro Ramos, Pedro Vilaça, Advanced technique for non-destructive testing of friction stir welding of metals, *Measurement* (ISSN: 0263-2241), Volume 43, Issue 8, 2010, pp. 1021-1030; DOI:10.1016/j.measurement.2010.02.006;
- [5] Telmo Santos; Ramos, P.M.; PV Vilaça; Non destructive testing of friction stir welding: Comparison of planar eddy current *Probes*, *Proc IMEKO TC4 Symp.*, Florence, Italy, Vol. 507, pp. 512 – 6, September, 2008;
- [6] T. G. Santos, Pedro Vilaça, Luís Rosado, Moisés Piedade, Pedro Ramos, Developments in NDT of Friction Stir Welding Using Eddy Currents, *Proceedings of 10th ECNDT – European Conference on NDT*, Moscow, 7 – 11 June, 2010 (Part 1, 2nd edition, Publishing house Spektr, ISBN: 978-5-904270-26-1, pp. 88-89);
- [7] L. Rosado, M. Piedade, Pedro M. Ramos, Telmo G. Santos, Pedro Vilaça, A Reconfigurable Digital Signal Processing System for Eddy Currents Non-Destructive Testing, *I2MTC 1010*, Texas, USA, 3-6 May, 2010, ISSN: 1091-5281, pp. 1284 – 1289, DOI: 10.1109/IMTC.2010.5488183;
- [8] L. Rosado, T. Santos, M. Piedade, Pedro M. Ramos, P. Vilaça, New Non – Destructive Test Technique on Metal Inspection, *IMEKO 2009 – Fundamental and Applied Metrology*, Lisbon, 6 – 11 September, pp. 443 - 448, 2009;
- [9] Li Shu, Huang Songling, Zhao Wei, Yu Peng, Study of pulse eddy current *Probes* detecting cracks extending in all directions, *Sensors and Actuators A*, Vol. 141, pp. 13–19, 2008.
- [10] <[http://www.olympus-ims.com/pt/?\\_s\\_icmp=ooproduct015](http://www.olympus-ims.com/pt/?_s_icmp=ooproduct015)>. Acesso em Outubro de 2010.
- [11] Neil J. Goldfine, Andrew P. Washabangh, Karen E. Walrath, Ian C. Shay, David C. Grundy, Mark Windoloski Darrell E. Schlicker, "EDDY CURRENT SENSOR ARRAY HAVING DRIVE WINDINGS WITH EXTENDED PORTIONS," 2004/0232911 A1, Junho 23, 2004.

- [12] H.-J. Krause, M.v. Kreutzbruck, Recent developments in SQUID NDE, *Physica C*, Vol. 368, pp. 70-79, 2002.
- [13] <[http://en.wikipedia.org/wiki/Giant\\_magnetoresistance](http://en.wikipedia.org/wiki/Giant_magnetoresistance)>. Acesso em Outubro de 2010.
- [14] E.Y.Tsymbal and D.G.Pettifor, “Prespectives of Giant Magnetoresistence”, published in *Solid State Physics*, ed. by H. Ehrenreich and F. Spaepen, Vol. 56, pp.113-237 Academic Press, 2001.
- [15] R. Coehoorn, Philips Research Laboratories, Prof. Holstlaan 4, 5656 AA Eindhoven, The Netherlands, and Eindhoven University of Technology, Department of Applied Physics, P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands, “Giant magnetoresistance and magnetic interactions in exchange-biased spin-valves”, *Handbook of Magnetic Materials*, vol. 15, ed. K.H.J. Buschow, Elsevier, Amsterdam (2003).
- [16] Paul E. Mix, “INTRODUCTION TO NONDESTRUCTIVE TESTING”, John Wiley & Sons, Inc, Second Edition, A Training Guide, pp 65-95, 2005.
- [17] <<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Introduction/IntroductiontoET.htm>>. Acesso em Outubro de 2010.
- [18] Neil Goldfine, David Grundy, Vladimir Zilberstein, “Friction Stir Weld Inspection Through Conductivity Imaging using Shaped Field MWM-Arrays”, *Proceedings of the 6th International ASM Trends in Welding Conference*, 2003.
- [19] Neil Goldfine, David Grundy, Vladimir Zilberstein, “MWM® - Array Inspection for Quality Control of Friction Stir Welded Extrusions”, *Proceedings of the 7th International Conference on Trends in Welding Research*, 2005.
- [20] Helena G. Ramos, A. Lopes Ribeiro and F. Corrêa Alegria, “GMR Based Eddy Current Sensing *Probe* for Weld Zone Testing”, *IEEE SENSORS Conference*, 2009.
- [21] John Clarke, Alex I. Braginski (Eds.), “The SQUID Handbook”, WILEY-VCH, Vol. II applicaton of SQUIDS and SQUID systems, pp. 441-472, 2006.
- [22] HALLIDAY RESNICK WALKER, “Fundamento de Física – Volume 3: Electromagnetismo”, 6ª Edição, LTC Editora, pp.89 e pp.164, 2001
- [23] Luís Filipe Rosado; “Non-Destructive Testing Based on Eddy Currents: Detector de Falhas em Soldadura”, Master’s Degree Dissertation in Electronics Engineering, IST, UTL, Lisboa, Novembro 2009.

[24] João Faria; Aplicação de Ensaio Não Destrutivos por Correntes Induzidas à Caracterização de Propriedades Eléctricas de Materiais Processados no Estado Sólido. MSc Thesis, FCT, UNL, Lisbon, November 2010.

[25] <<http://www.trackwise.co.uk/>>. Acesso Junho de 2011. Morada: Trackwise, 4B Delta Drive Tewkesbury GL20 8HB UK.



## **ANEXOS**



## A1 – Gama de frequências para uma profundidade de penetração de 36.8%

Tabela T 1 - Profundidade de penetração de 36.8% e a gama de frequências passível de utilizar.

Metal	Conductivity		Permeability	36.8% Depth of penetration					
	% IACS	Resistivity		1 KHz	4 KHz	16 KHz	64 KHz	256 KHz	1 MHz
Copper	100	1.7	1	0.082	0.041	0.021	0.010	0.005	0.0026
6061 T-6	42	4.1	1	0.126	0.063	0.032	0.016	0.008	0.004
7075 T-6	32	5.3	1	0.144	0.072	0.036	0.018	0.009	0.0046
Magnesium	37	4.6	1	0.134	0.067	0.034	0.017	0.008	0.0042
Lead	7.8	22	1	0.292	0.146	0.073	0.37	0.018	0.0092
Uranium	6.0	29	1	0.334	0.167	0.084	0.042	0.021	0.0106
Zirconium	3.4	70	1.02	0.516	0.258	0.129	0.065	0.032	0.0164
Steel	2.9	60	750	0.019	0.0095	0.0048	0.0024	0.0012	0.0006
Cast steel	10.7	16	175	0.018	0.0089	0.0044	0.0022	0.0011	0.0006

## A2 – Propriedades Eléctricas dos Blocos utilizados nas Simulações Numéricas

### A 2.1 – Propriedades Eléctricas gerais do Alumínio no *Software CST Studio Suite*

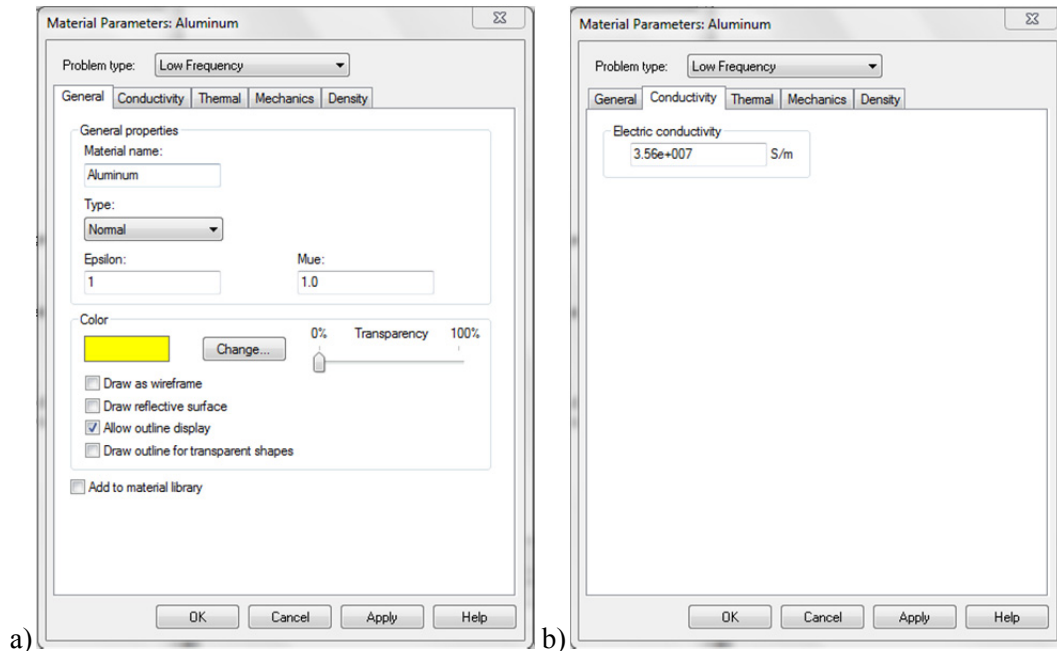


Figura A 1 – Caracterização do Bloco de Alumínio no *Software CST Studio Suite*.

- a) Propriedades gerais do bloco de MB, definição da cor, do nome do material e de alguns aspectos visuais.
- b) Valor da condutividade do MB.

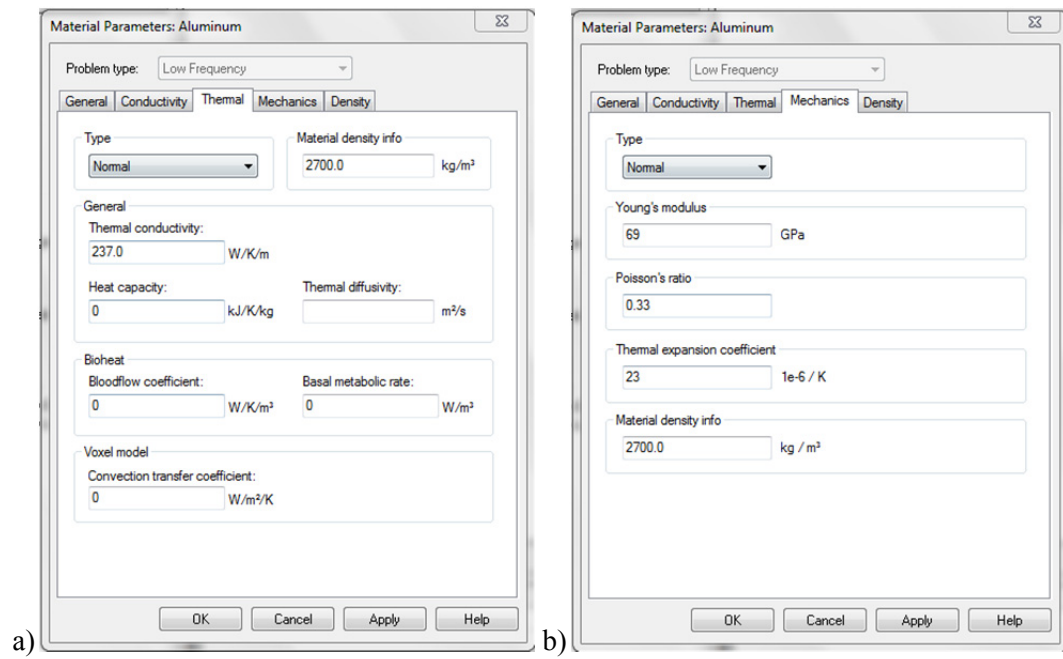


Figura A 2 – a) Propriedades térmicas do MB no *Software CST Studio Suite*.  
b) Propriedades mecânicas do MB.

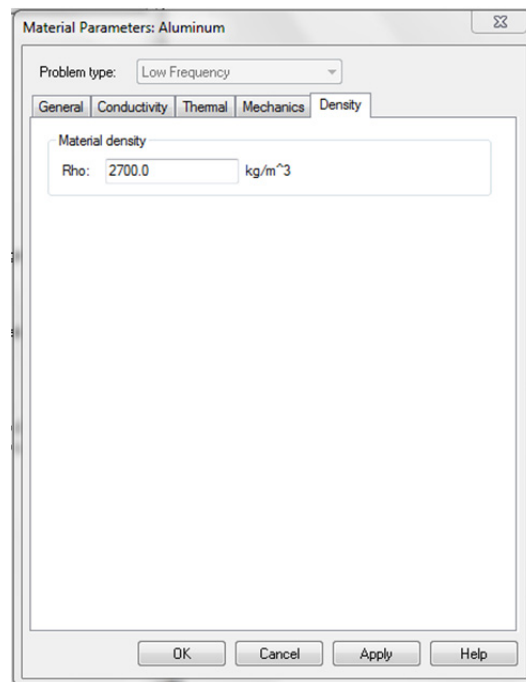


Figura A 3 – Densidade do material Base no *Software CST Studio Suite*

## A 2.2 – Propriedades Eléctricas gerais do Ar no *Software CST Studio Suite*

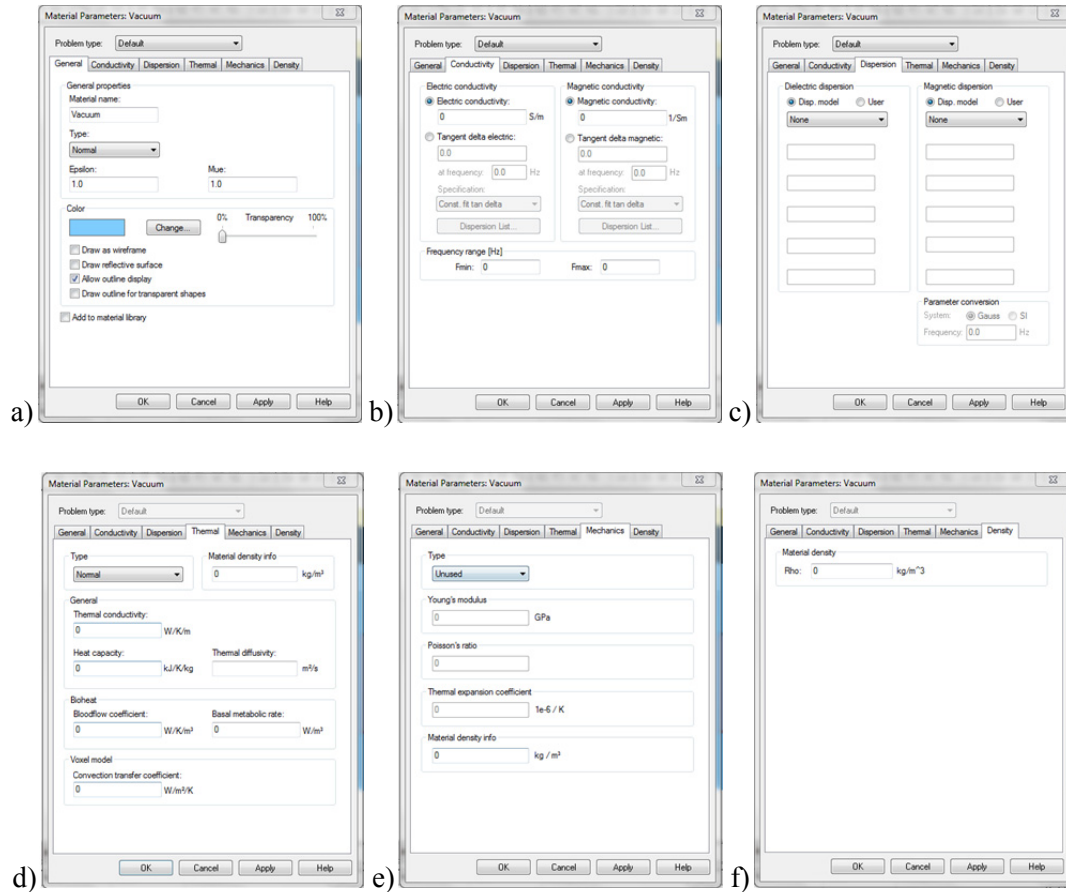


Figura A 4 - Caracterização do Bloco de Ar no *Software CST Studio Suite*.

- a) Propriedades gerais do bloco de Ar, onde se define o nome do material e aspectos visuais.
- b) Condutividade do Ar. c) Dispersão do ar mostrando a componente magnética e dieléctrica.
- d) Propriedades térmicas do Ar. e) Propriedades mecânicas do ar.
- f) Densidade do ar.

**A3 – Desenhos técnicos de produção das peças que compõem a mesa XY.**

**A 3.1 – Apoio da Roldana**

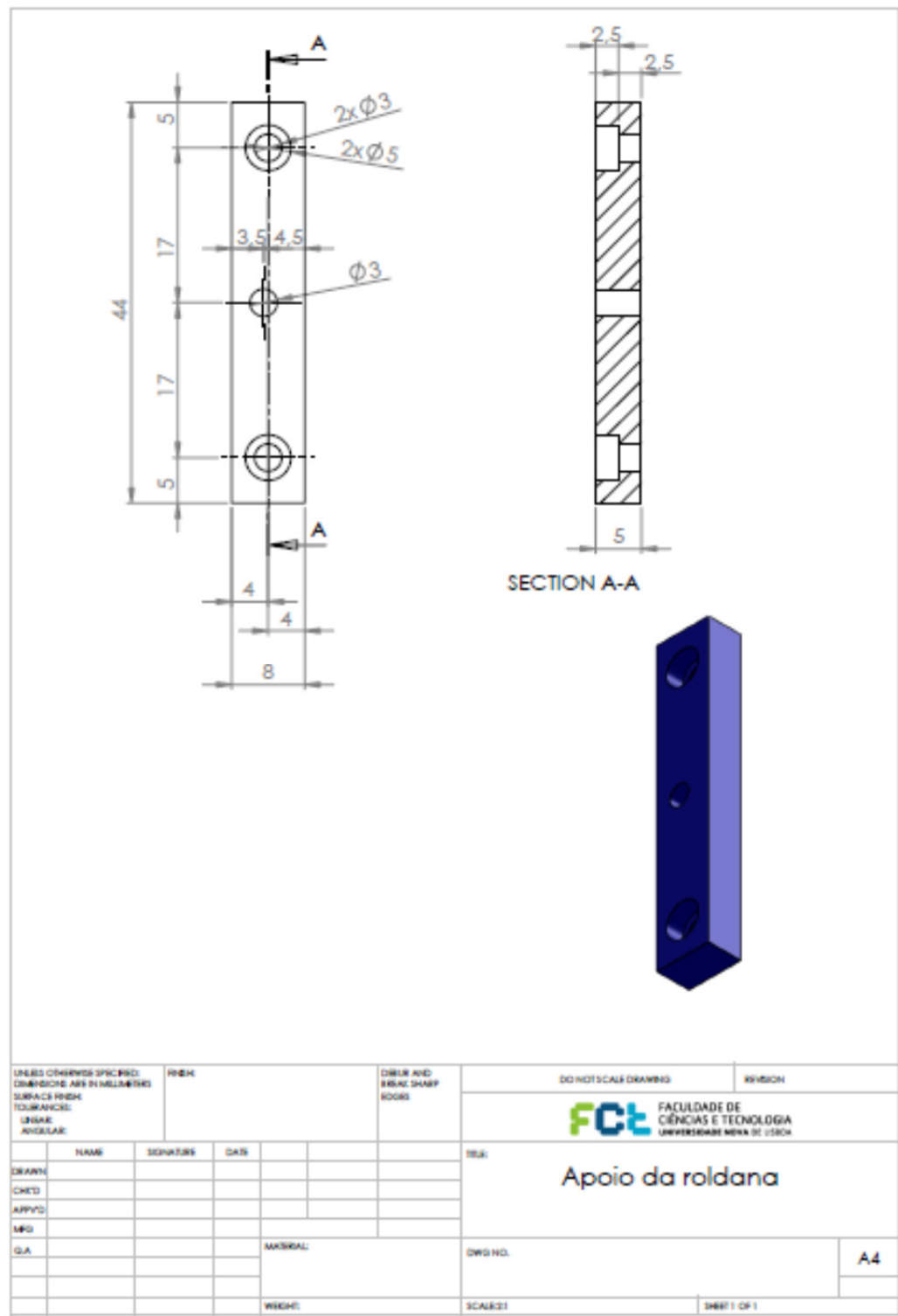


Figura A 5 – Desenho técnico do apoio da roldana

### A 3.2 – Suporte do motor do eixo X

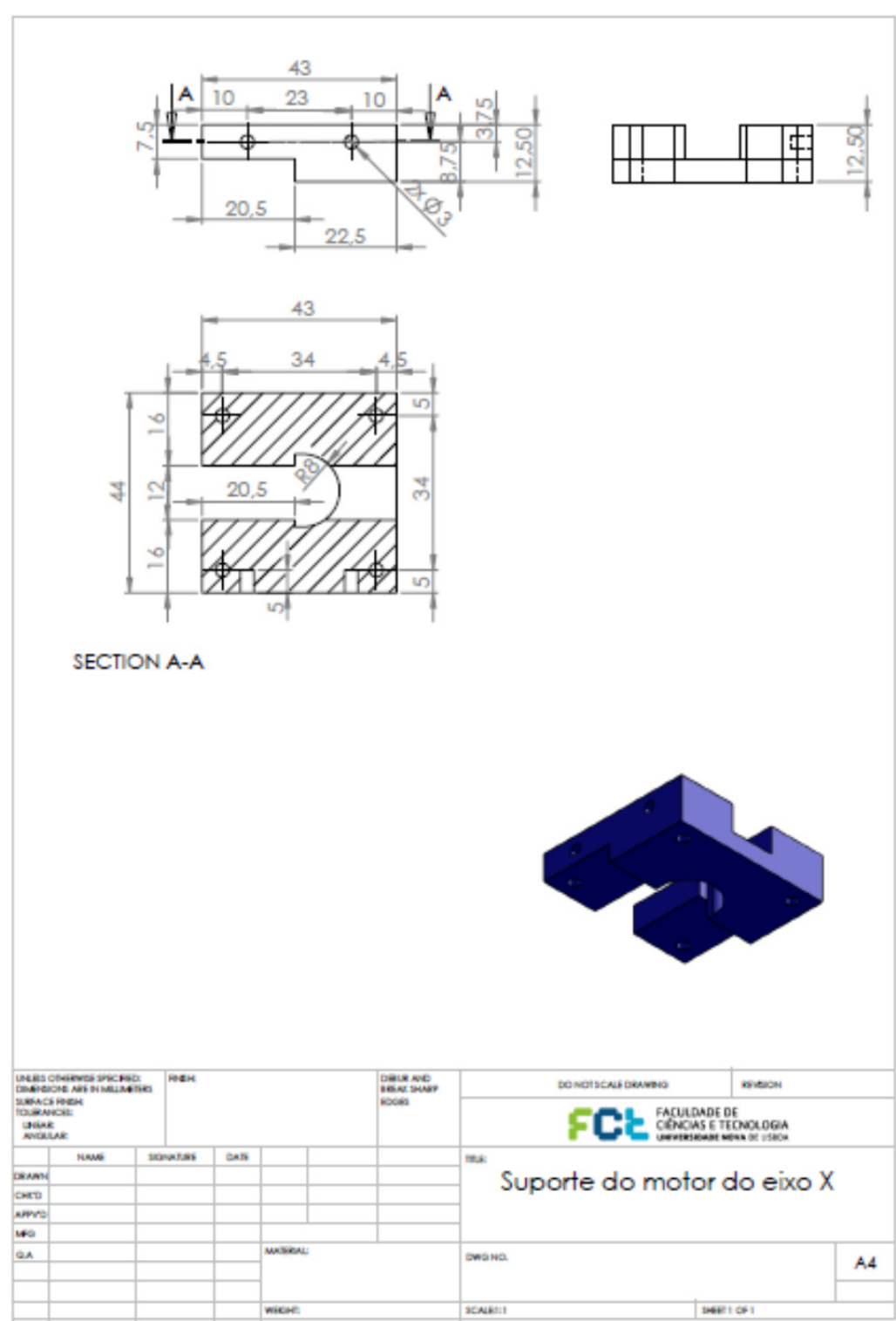


Figura A 6 – desenho técnico do suporte do motor do eixo X.

A 3.3 – Suporte do motor do eixo Y

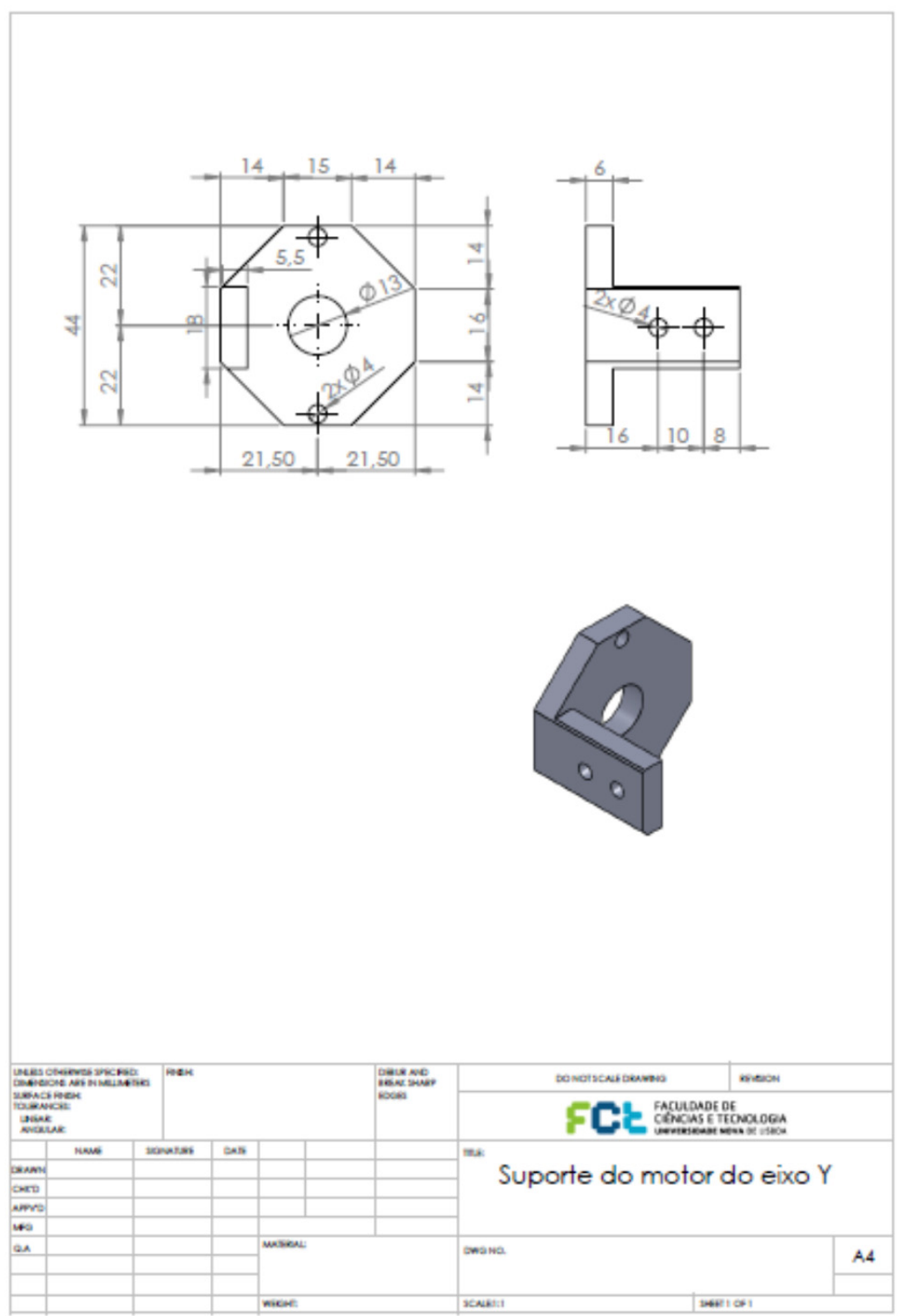


Figura A 7 – desenho técnico do suporte do motor do eixo Y.

### A 3.4 – Suporte de ligação do barramento principal à estrutura base

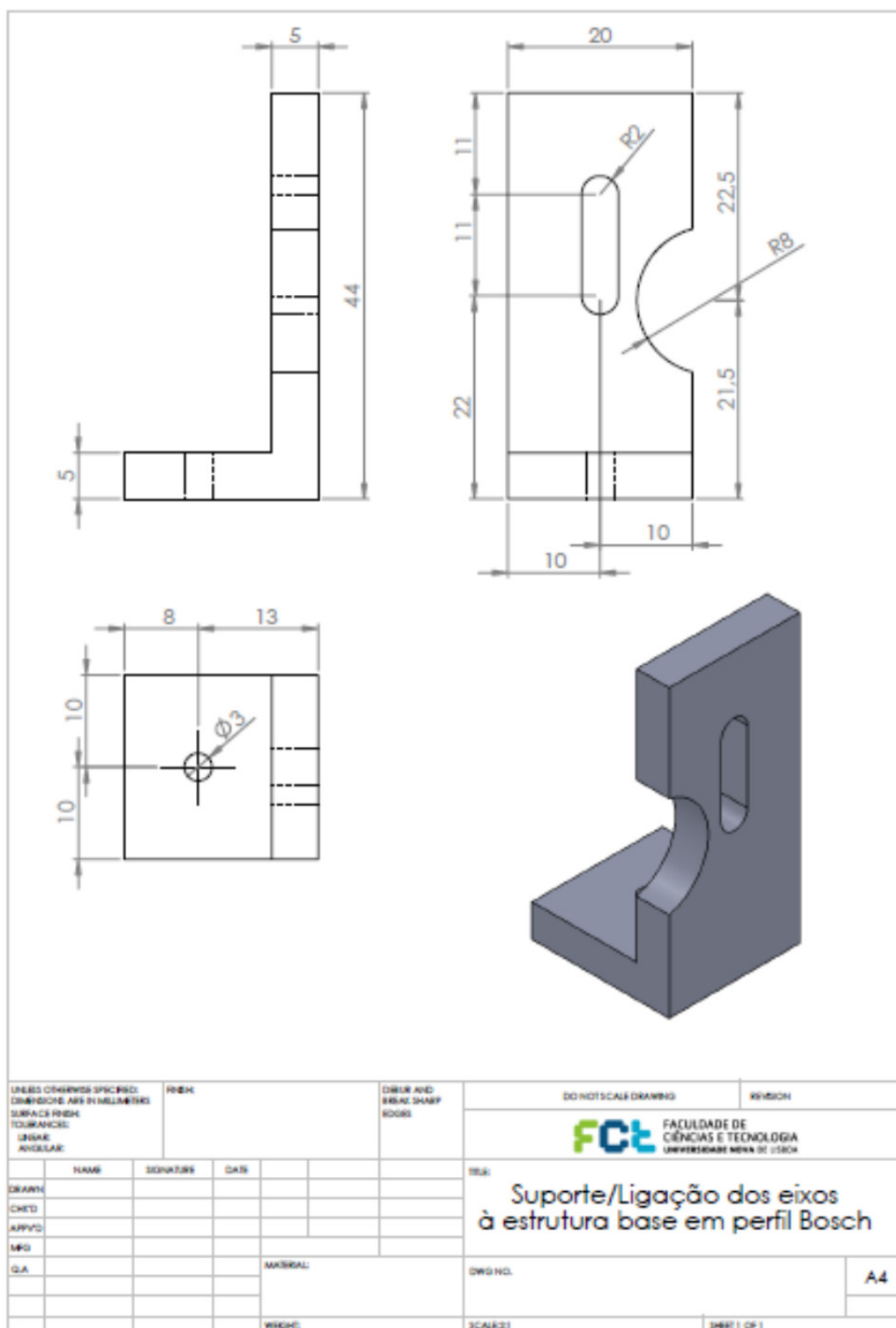


Figura A 8 – Desenho técnico do suporte que liga o barramento à estrutura base em perfil Bosch



### A 3.5 – Suporte das sondas principais

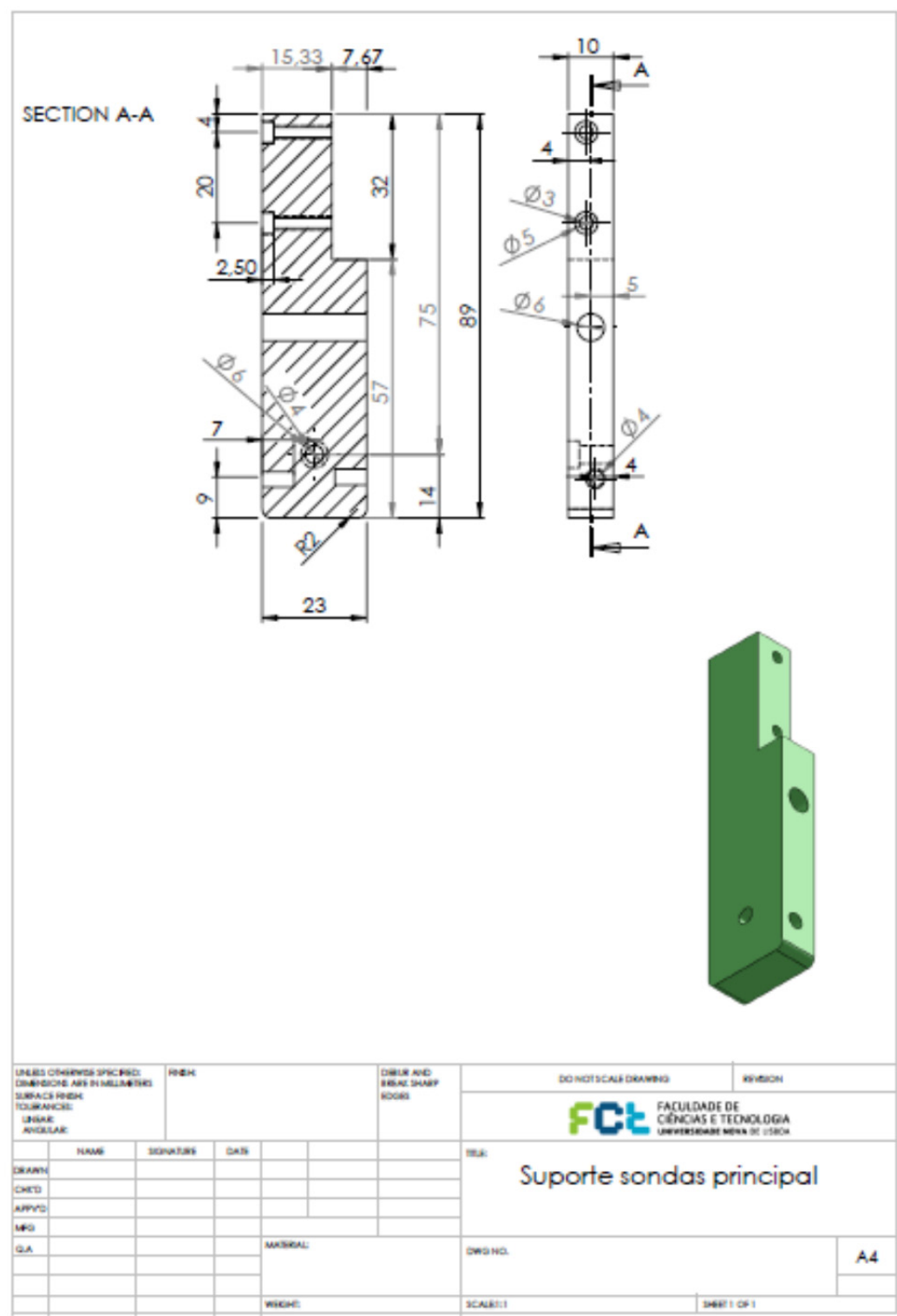


Figura A 9 – Desenho técnico do suporte das sondas principais

### A 3.6 – Suporte da ficha de ligação para o motor do eixo Y

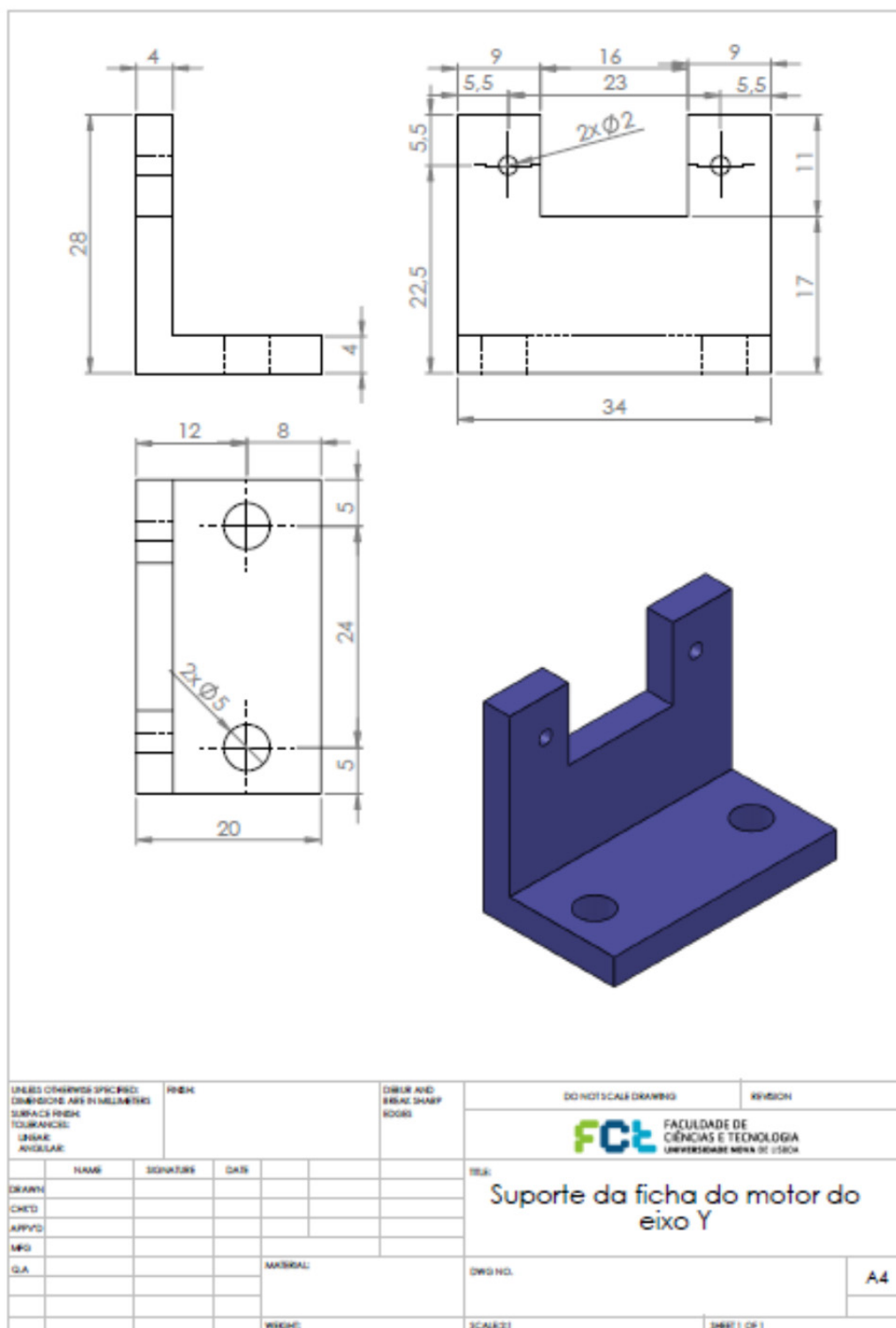


Figura A 10 – Desenho técnico do suporte da ficha para o motor do eixo Y

### A 3.7 – Suporte das sondas para o eixo Y

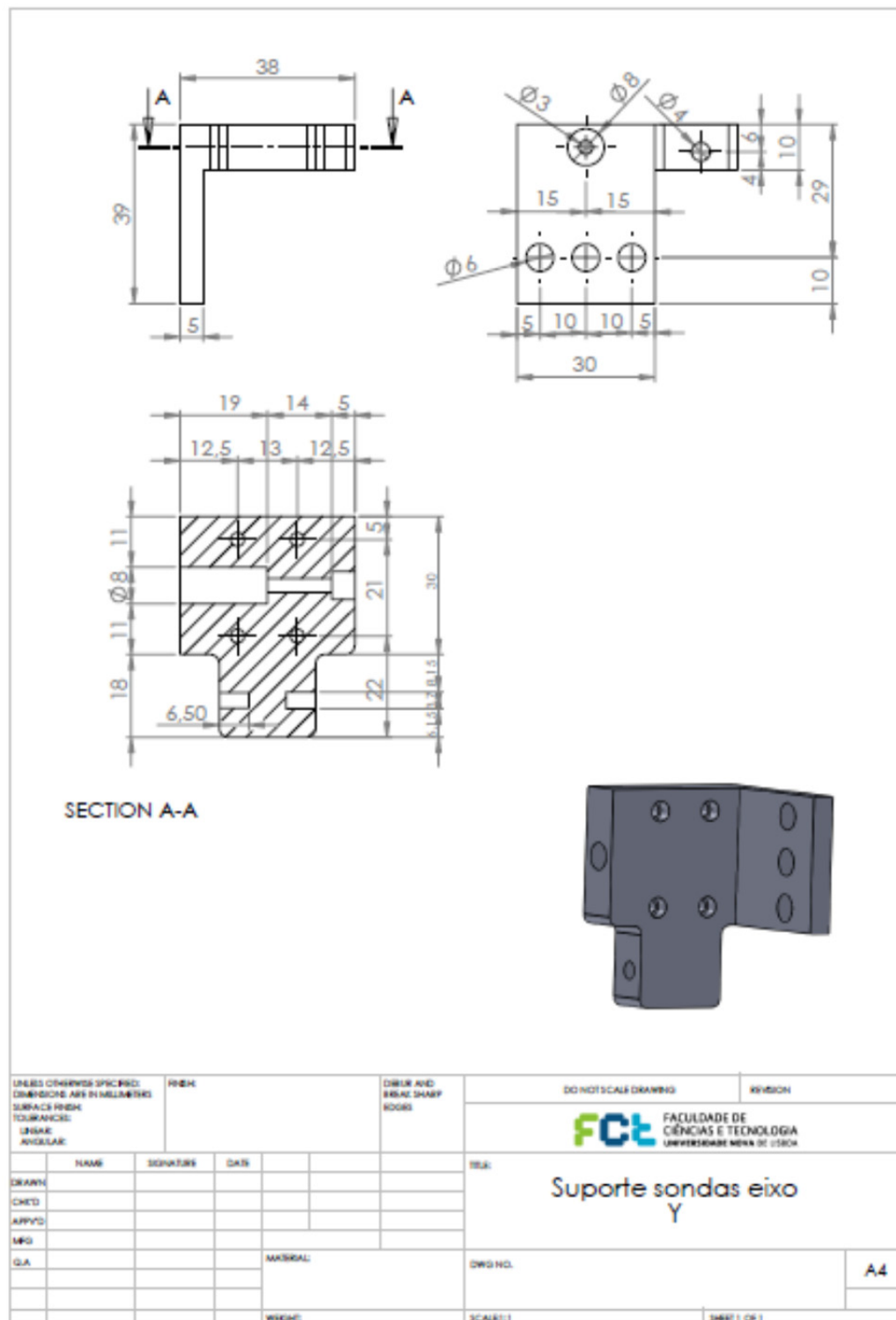


Figura A 11 – Desenho técnico do suporte das sondas para o eixo Y

### A 3.8 – Suporte para o carro do barramento

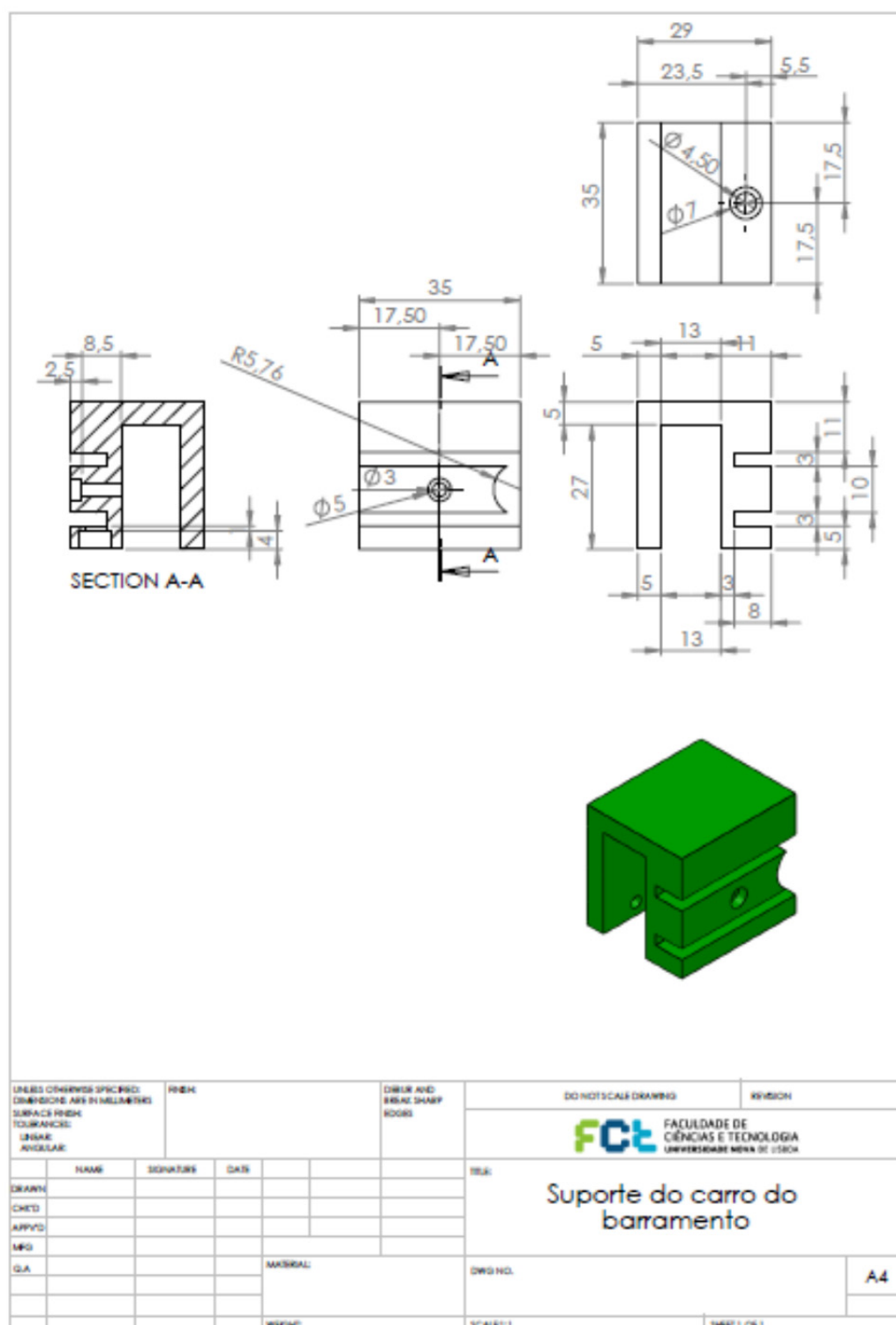


Figura A 12 – Desenho técnico do suporte que encaixa no carro do barramento e que permite ligar as diferentes peças que suportam as sondas.

### A 3.9 – Suporte da ficha de ligação do motor do eixo X

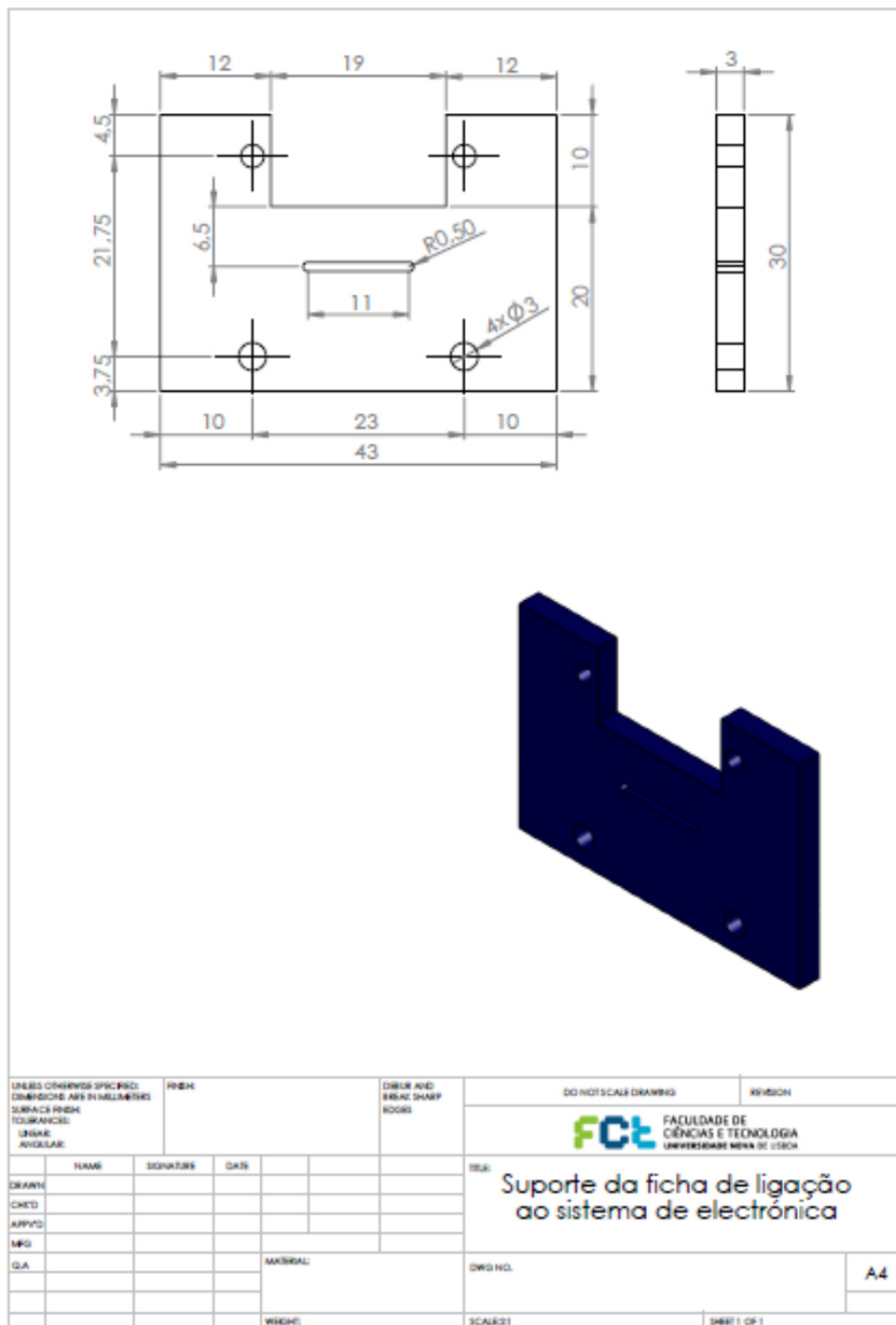


Figura A 13 – Desenho técnico do suporte da ficha de ligação para o motor do eixo X

A 3.10 – Suporte de ligação do barramento à estrutura base

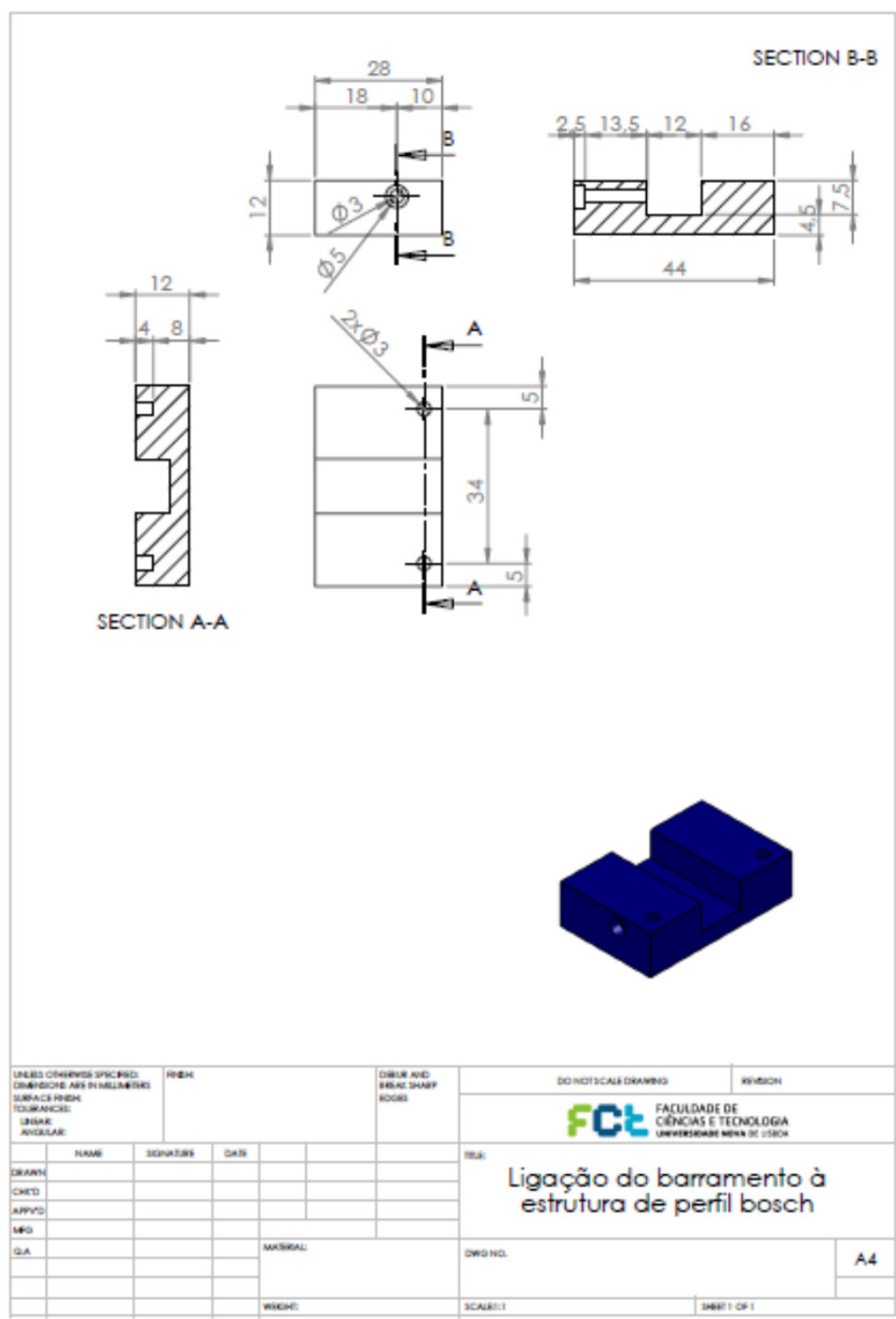


Figura A 14 – Desenho técnico do suporte de ligação do barramento à estrutura base

A 3.11 – Dimensões gerais da mesa XY

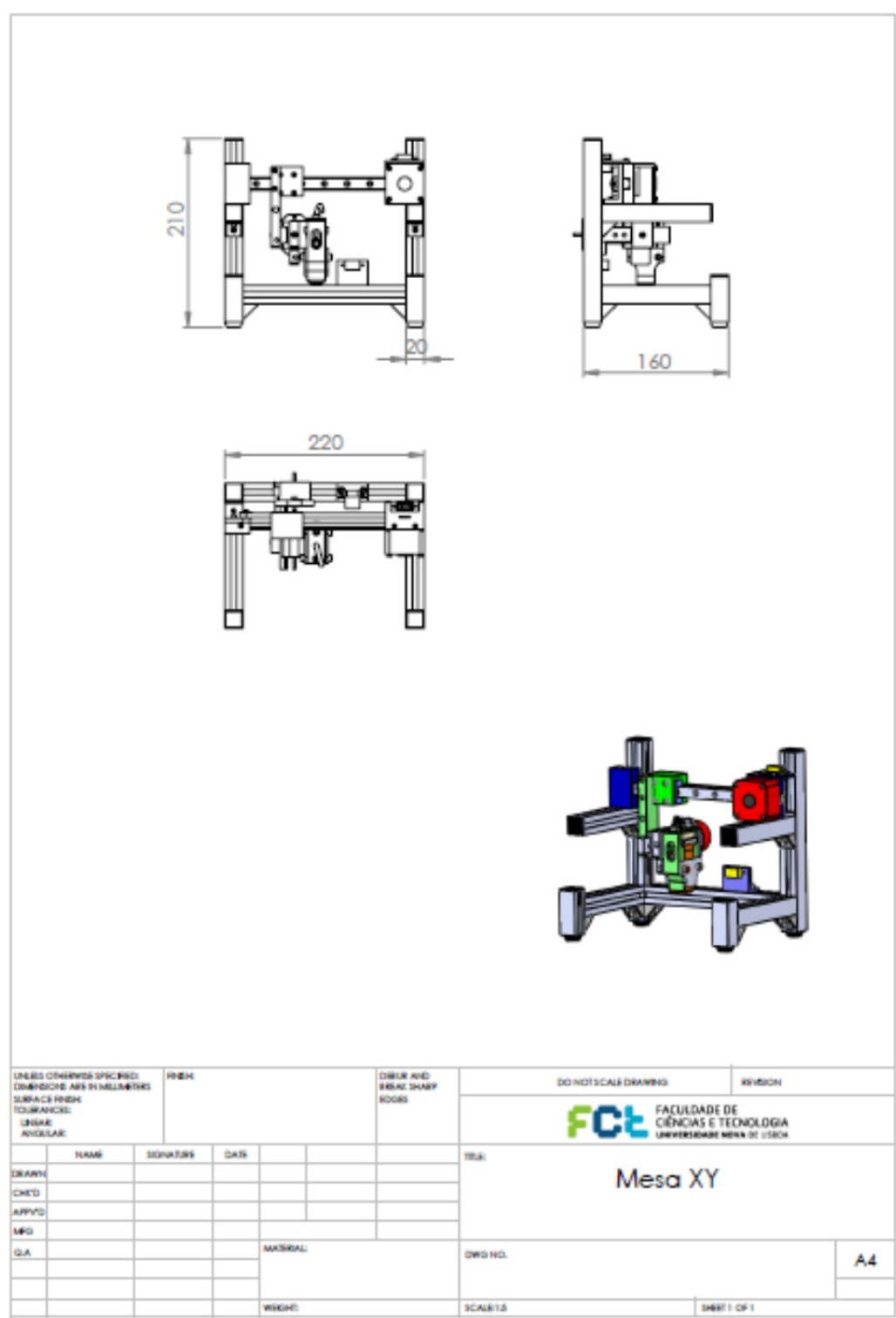


Figura A 15 – Desenho técnico onde se apresenta as medidas gerais da mesa XY desenvolvida

## A4 – Exemplo de Código LabVIEW8.6 do *Software* IONic

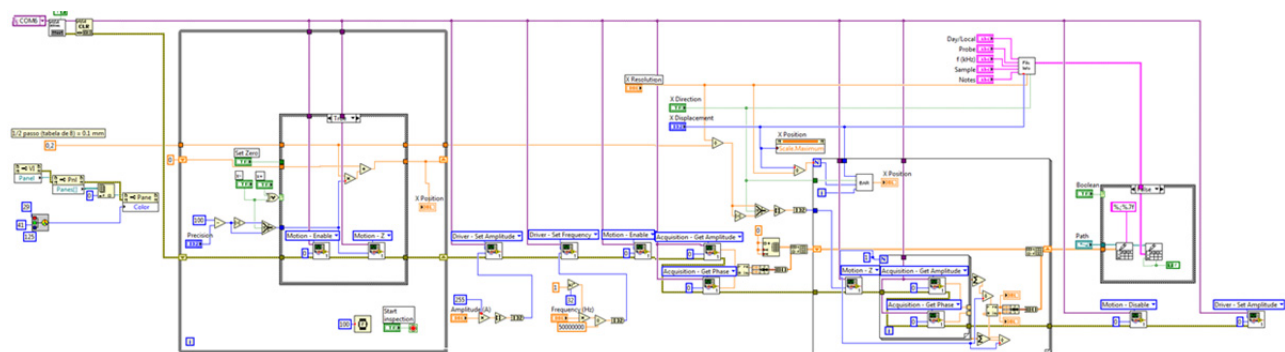


Figura A 16 – Exemplo de Código LabVIEW8.6 do *Software* IONic